สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบใช้ไดโอด

Diode Temperature Sensor

โดย

นาย ศิริเชษฐ์ ลีลามานิตย์

นาย สันต์ หงษ์ทรงเกียรติ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 72160
วัน,เดือน,ปี 11 มิ.ย. 2550

b 11764181
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบใช้ไดโอด

Diode Temperature Sensor

โดย

นาย ศิริเชษฐ์ ลีลามานิตย์ รหัส 46010738

นาย สันต์ หงษ์ทรงเกียรติ รหัส 46010820

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. เติมพงษ์ เพ็ชรกูล

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบใช้ไดโอด (Diode Temperature Sensor)

ผู้จัดทำ

1. นาย ศิริเชษฐ์ ลีลามานิตย์ รหัส 46010738
2. นาย สันต์ หงษ์ทรงเกียรติ รหัส 46010820

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบใช้ไดโอด

นาย ศิริเชษฐ์ ลีลามานิตย์
นาย สันต์ หงษ์ทรงเกียรติ
รศ.ดร. เติมพงษ์ เพ็ชรกูล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ในรายงานนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาการทำงานและกระบวนการสร้างของ Thermal Diode เพราะง่ายต่อการศึกษาและสามารถสร้างได้ โดยไดโอดนั้นจะมีรอยต่อของแต่ละชนิดแตกต่างกันไป จึงต้องมีการศึกษาการทำงานและคุณสมบัติของไดโอดที่มีรอยต่อที่แตกต่างกันนี้ ว่ามีปัจจัยตัวไหนบ้างที่มีส่วนเกี่ยวข้อง เมื่อมีการทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งจะใช้ค่าแรงดันเป็นตัวแสดงผลและนำมาเปรียบเทียบว่าไดโอดที่มีรอยต่อที่ต่างกันออกไปนั้น รอยต่อชนิดใดที่มีความไวหรือมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นอย่างไร โดยในการศึกษาจะใช้ไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ซีเนอร์ไดโอด ช็อตต์คีย์ไดโอด และ LED มาทำการไบอัสด้วยวงจรจ่ายกระแสคงที่ให้ไดโอดแต่ละชนิดที่ค่ากระแสต่าง ๆ กัน แล้วทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้นั้นไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นจะมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด แสดงให้เห็นได้ว่าไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นเหมาะสำหรับนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ จากนั้นได้ทำการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นขึ้น ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นจะเปลี่ยนแปลง 2 mV ทุก ๆ 1 องศาเซลเซียสที่เปลี่ยนแปลงไป และเป็นความสัมพันธ์ที่แปลผกผันกันแบบเชิงเส้น โดยค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะนำไปต่อร่วมกับวงจรแสดงผลแบบอนาลอก โดยจะขยายผลต่างแรงดันจาก 2 mV ต่อองศาเซลเซียสเป็น 10 mV ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งวงจรที่ใช้จะใช้แสดงอุณหภูมิได้ในช่วง 0 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยไดโอดที่สร้างขึ้นมานั้นมีคุณสมบัติที่เป็นไปตามทฤษฎี และนำมาใช้วัดอุณหภูมิได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Diode Temperature Sensor

Mr.Sirichet Leelamanit

Mr.Sant Hongsongkiat

Associate Prof. Dr.Toempong Phetchakul Adviser

Educational Year 2006

Abstract

The objective of this report is to describe properties and a process to fabricate a thermal diode because it is easy to understand and to fabricate. Each diode has its own junction and we will study properties of each diode. The report will describe all factors that will impact on the change of temperature. One of the factors that we are interested in is the voltage, it is a factor to compare the differences between each junction. If junction and temperature change, the voltage can give different results. In our study, P-N Diode, Zener Diode, Schottky Diode and LED will be biased by different constant current source and will be measured by different temperature. The results have shown that the P-N Diode has the most lineate. Thus, the P-N Diode is suitable to be fabricated to temperature sensors. Then, we fabricate P-N Diode which impacts on the difference in the voltage of P-N Diode. In every 1 degree Celsius change, the voltage of P-N Diode will changes 2 mV which define the relationship in Inverse Linear pattern. The change of voltage will be connected to Analog Display Circuit and be amplified from 2 mV to 10 mV. The circuit we used shows the temperature range from 0 – 150 degrees Celsius. The P-N Diode we fabricate are both theoretical basis and practical use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานเรื่องเซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบใช้ไดโอด (Diode Temperture Sensor) ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดีเพราะได้รับความเอื้อเฟื้อ ,ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และการแนะนำทั้งทางด้านทฤษฎีและการปฏิบัติจาก รศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึง รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช ที่ได้ให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีสารกึ่งตัวนำมาโดยตลอด รวมทั้งความช่วยเหลือในการสร้างพีเอ็นไดโอดจากรุ่นพี่ปริญญาโท คือ นาย รัฐพงษ์ นาคาไชย และนักวิจัยประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นาย วีระ เพ็งจันทร์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และ และขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ให้โอกาสเข้ามาทำโครงงานชิ้นนี้ ทำให้ข้าพเจ้าได้มีความรู้ความสามารถและประสบการณ์ที่นำไปประยุกต์ใช้ได้ต่อไป

จึงขอขอบพระคุณทุกท่านและศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มา ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

นาย ศิริเชษฐ์ ลีลามานิตย์

นาย สันต์ หงษ์ทรงเกียรติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซ็นเซอร์	1
1.2 ระบบการวัด	2
บทที่ 2 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ	3
2.1 Resistance Temperature Detector (RTD)	3
2.2 เทอร์มิสเตอร์ (Thermister)	4
2.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	5
2.4 เซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ (Thermal Diode)	7
บทที่ 3 ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ	10
3.1 ผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค	10
3.2 ไดโอดจากรอยต่อพีและเอ็น (P-N Diode)	12
3.2.1 รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง	14
3.2.2 รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	18
3.3 ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode)	19
3.4 ช็อตต์คีย์ไดโอด (Schottky Diode)	21
3.4.1 การให้ไบอัสแก่ชื่อตต์คีย์ไดโอด	22
3.4.1.1 กรณีไบอัสตรง (Forward Bias)	22
3.4.1.2 กรณีไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias)	23
3.4.2 กระแสที่ไหลในชื่อตต์คีย์ไดโอด	25
3.5 ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)	28
3.5.1 ช่องแถบตรง (Direct Band Gap) และช่องแถบไม่ตรง (Indirect Band Gap)	29
บทที่ 4 กระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	35
4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน	35
4.2 กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process)	38
4.3 กระบวนการสร้างชั้นอ๊อกไซด์ (SiO_2)	39
4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithographic Process)	42
4.4.1 การเคลือบน้ำยาไวแสง	42
4.4.2 การอบ Prebake	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3 การถ่ายแบบ (Mask Alignment and Expose)	43
4.4.4 การ Development	44
4.4.5 การอบ Postbake	45
4.5 การ Etching	45
4.6 การลอกน้ำยาไวแสง	46
4.7 กระบวนการเติมสารเจือ	46
4.7.1 การแพร่ (Diffusion Process)	46
4.7.2 การฝังไอออน (IonImplantion)	47
4.8 กระบวนการ Evaporation	50
4.9 การะบวนการซินเตอร์ริ่ง (Sintering)	52
รูปตัดขวางขั้นตอนกระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	54
4.10 วงจรที่ใช้ร่วมกับ Thermal Diode	60
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	66
5.1 วงจรจ่ายกระแสคงที่	66
5.2 ผลการทดลอง	70
5.2.1 ผลการทดลองส่วนที่หนึ่ง กราฟที่ให้กระแสแก่ไดโอดที่ค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการทดลอง	70
5.2.2 ผลการทดลองส่วนที่สอง กราฟที่ให้กระแสแก่ไดโอดที่ค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการซิมมูเลชั่น	74
5.2.3 ผลการทดลองในส่วนที่สาม กราฟของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับอุณหภูมิ	76
5.2.4 ผลการทดลองในส่วนที่สาม ตารางแสดงการเปรียบเทียบความไวของอุณหภูมิ กับไดโอดแต่ละชนิด	78
5.2.5 ผลการทดลองของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ	79
บทที่ 6 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	82
ภาคผนวก	83
กิตติกรรมประกาศ	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ระบบกระบวนการพื้นฐานของเซ็นเซอร์ 1
รูปที่ 1.2 ระบบกระบวนการพื้นฐานของ Thermal Diode 2
รูปที่ 1.3 องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัดอุณหภูมิ 2
รูปที่ 2.1 เทอร์โมมิเตอร์แบบ electrical resistance 3
รูปที่ 2.2 การต่อเทอร์มิสเตอร์ในวงจรฮาล์ฟบริดจ์ 5
รูปที่ 2.3 ลักษณะพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล 6
รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานการใช้ IC temperature sensor 7
รูปที่ 3.1 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอีกทรินซิคที่อุณหภูมิต่าง 11
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในซิลิคอนชนิดเอ็น กับอุณหภูมิ 12
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะไดโอดแบบรอยต่อพีและเอ็น 12
รูปที่ 3.4 (a) แสดงลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี
(b) ลักษณะรอยต่อพี-เอ็นเมื่อเริ่มสัมผัส 13
รูปที่ 3.5 รอยต่อพีเอ็นในขณะสมดุลความร้อน 13
รูปที่ 3.6 แถบพลังงานขณะสภาวะสมดุลความร้อน 14
รูปที่ 3.7 แสดงการให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อพีเอ็น 15
รูปที่ 3.8 แสดงแถบพลังงานขณะไบอัสตรง 15
รูปที่ 3.9 แสดงการให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อพีเอ็น 18
รูปที่ 3.10 แสดงแถบพลังงานขณะไบอัสย้อนกลับ 18
รูปที่ 3.11 กราฟระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น 19
รูปที่ 3.12 ลักษณะโครงสร้างของซีเนอร์ไดโอด 19
รูปที่ 3.13 แถบพลังงานของซีเนอร์ไดโอด 20
รูปที่ 3.14 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่าง ๆ 21
รูปที่ 3.15 ช็อตคีย์ไดโอดที่ใช้งานกันทั่ว ๆ ไป 21
รูปที่ 3.16 การให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น 22
รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่	3.18 การให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	24
รูปที่	3.19 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	24
รูปที่	3.20 ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)	28
รูปที่	3.21 การปลดปล่อยหรือคายพลังงานของอิเล็กตรอน	29
รูปที่	3.22 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเป็นช่องแถบตรง	30
รูปที่	3.23 การปลดปล่อยหรือคายพลังงานของสารที่มีคุณสมบัติช่องแถบไม่ตรง	30
รูปที่	3.24 ลักษณะของแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงที่มีคุณสมบัติของช่องแถบตรง (Direct Band Gap)	31
รูปที่	3.25 ย่านของแสงที่สามารถมองเห็นได้	32
รูปที่	4.1 ขนาดของไดโอดที่ได้ออกแบบ	35
รูปที่	4.2 มาส์กทั้ง 4 ที่ได้ออกแบบในโปรแกรม Correl Draw	36
รูปที่	4.3 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการหักแล้ว	37
รูปที่	4.4 Chamber ไว้ใช้สำหรับเตรียมสาร	39
รูปที่	4.5 การแพร่แบบ Wet Oxidation ที่ต้องใช้ไอน้ำในการแพร่	40
รูปที่	4.6 เครื่องสปินเนอร์	43
รูปที่	4.7 เครื่องถ่ายแบบ	44
รูปที่	4.8 เตาอบที่ใช้ในการอบ Prebreak และ Postbake	45
รูปที่	4.9 แผ่นซิลิคอนขณะเอาเข้าเตาอบเพื่อทำการแพร่อะตอมสารเจือ	48
รูปที่	4.10 แผ่นซิลิคอนขณะนำเข้าเตาอบ	49
รูปที่	4.11 เครื่อง Evaporation	50
รูปที่	4.12 ไนโตรเจนเหลวที่ใช้เติมเพื่อลดความดัน	51
รูปที่	4.13 เครื่องที่ใช้ในการ Sintering	52
รูปที่	4.14 ท่อที่นำเข้าไปในเตาเพื่อทำการ Sintering	52
รูปที่	4.15 การวัดอุณหภูมิภายในเตาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล	52
รูปที่	4.16 แผ่นซิลิคอนหลังจากสร้างเสร็จแล้ว	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 แผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้	54
รูปที่ 4.18 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการเคลือบชั้นอ๊อกไซด์	54
รูปที่ 4.19 แผ่นซิลิคอนหลังจากเคลือบน้ำยาไวแสง	54
รูปที่ 4.20 การถ่ายแบบของแผ่นซิลิคอน	55
รูปที่ 4.21 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการ Develop	55
รูปที่ 4.22 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการ Etching	56
รูปที่ 4.23 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านขั้นตอนการลอกน้ำยาไวแสง	56
รูปที่ 4.24 แผ่นซิลิคอนหลังจากแพร่สารเจือพี	56
รูปที่ 4.25 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการเคลือบน้ำยาไวแสง	57
รูปที่ 4.26 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการฉายด้วยแสง	57
รูปที่ 4.27 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการ Develop	58
รูปที่ 4.28 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการ Etching	58
รูปที่ 4.29 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านขั้นตอนการลอกน้ำยาไวแสง	58
รูปที่ 4.30 แผ่นซิลิคอนหลังจากแพร่สารเจือเอ็น	59
รูปที่ 4.31 แผ่นซิลิคอนหลังจากเปิดมาส์คที่ 3 เสร็จ	59
รูปที่ 4.32 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการ Evaporation	60
รูปที่ 4.33 แผ่นซิลิคอนหลังจากโฟโต้ครั้งที่ 4	60
รูปที่ 4.34 วงจรที่ใช้ร่วมกับเซ็นเซอร์อุณหภูมิโดยใช้ไดโอด	61
รูปที่ 4.35 ลายวงจรและการวางอุปกรณ์ของ Thermal Diode	63
รูปที่ 4.36 ส่วนภายในเครื่องเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ	64
รูปที่ 4.37 ส่วนแสดงผลของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ	64
รูปที่ 4.38 หัววัดเซนเซอร์อุณหภูมิที่ได้จากการสร้าง	65
รูปที่ 5.1 วงจรจ่ายกระแสคงที่	66
รูปที่ 5.2 รูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง	68
รูปที่ 5.3 เตาอบที่ใช้ในการทดลอง	68
รูปที่ 5.4 วงจรที่ใช้ทดลองซีเนอร์ไดโอด	69
รูปที่ 5.5 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อไดโอด	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.6 กราฟของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น 1N4148 ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการทดลอง 71

รูปที่ 5.7 กราฟของซีเนอร์ไดโอด (1N4728) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสย้อนกลับ 4 mA ที่ได้จากการทดลอง 72

รูปที่ 5.8 กราฟของช็อตต์คีย์ไดโอด (1N5819) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการทดลอง 73

รูปที่ 5.9 กราฟของไดโอดเปล่งแสง (LED : GaP) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กันที่ได้จากการทดลอง 73

รูปที่ 5.10 กราฟของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น 1N4148 ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการซิมมูเลชั่น 74

รูปที่ 5.11 กราฟของซีเนอร์ไดโอด (1N4728) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสย้อนกลับ 4 mA ที่ได้จากการซิมมูเลชั่น 75

รูปที่ 5.12 กราฟของช็อตต์คีย์ไดโอด (1N5819) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการซิมมูเลชั่น 75

รูปที่ 5.13 กราฟของไดโอดเปล่งแสง (LED : GaP) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการซิมมูเลชั่น 76

รูปที่ 5.14 กราฟของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับอุณหภูมิของ P-N Diode 77

รูปที่ 5.15 กราฟของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับอุณหภูมิของ Schottky diode 77

รูปที่ 5.16 เส้นกราฟแสดงคุณลักษณะของไดโอดที่สร้างขึ้น 80

รูปที่ 5.17 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิของเซ็นเซอร์ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น 81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตางรางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck ของวัสดุต่าง	7
ตารางที่ 2.2	ตารางแสดงข้อดีและข้อเสียของเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิชนิดต่าง ๆ	9
ตารางที่ 5.1	ตารางเปรียบเทียบค่าความชันที่ค่ากระแสต่าง ๆ	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

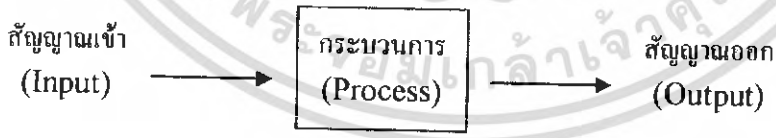
บทที่ 1

บทนำ

เซนเซอร์ คือ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ หรือปริมาณฟิสิกส์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ แสง เสียง ความดันบรรยากาศ ความเร็ว เป็นต้น จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนให้เป็น สัญญาณ หรือ ปริมาณอีกรูปแบบหนึ่ง ที่สามารถนำไปประมวลผลต่อไปได้ ในส่วนของการตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ นั้น มักจะถูกกำหนดตามความต้องการของอุตสาหกรรมที่จะตรวจสอบ ควบคุม หรือนำตัวแปรทางฟิสิกส์ไปใช้งาน ฉะนั้นในการเลือกใช้งานเซ็นเซอร์จึงควรเลือกใช้งานให้เหมาะสมตามสภาพแวดล้อม ลักษณะการใช้งาน และปริมาณทางฟิสิกส์ที่จะตรวจวัด เช่น การเลือกใช้งานเซ็นเซอร์อุณหภูมิ ถ้าเป็นการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี ก็ควรเลือกใช้เซ็นเซอร์ที่มีคุณสมบัติการทนอุณหภูมิสูง แรงดันสูง ทนการกัดกร่อนได้ดี และอาจจะต้องมีการตรวจจับอุณหภูมิได้ช่วงกว้างมาก เช่น -50 องศาเซลเซียส ถึง 300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะแตกต่างกับการเลือกใช้เซ็นเซอร์ในที่พักอาศัย ซึ่งไม่จำเป็นต้องทนอุณหภูมิสูงมากนัก และไม่จำเป็นต้องมีการตรวจจับอุณหภูมิได้ช่วงกว้างเหมือนเซ็นเซอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งถ้าเซ็นเซอร์สามารถทนอุณหภูมิได้สูง หรือสามารถวัดอุณหภูมิได้ช่วงกว้าง ก็หมายความว่าตัวเซ็นเซอร์จะต้องมีราคาสูงตามไปด้วย ซึ่งรายงานฉบับนี้จะเน้นการศึกษาเซ็นเซอร์อุณหภูมิ

การตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นหลักการวัดพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจาก ณ ที่อุณหภูมิค่าต่างกันนั้น วัสดุ อุปกรณ์ สสารแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติทางกายภาพ ตลอดจนพฤติกรรมที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันออกไป

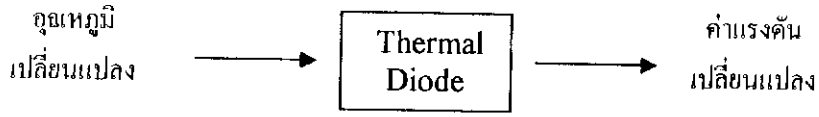
1.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซ็นเซอร์



รูปที่ 1.1 ระบบกระบวนการพื้นฐานของเซ็นเซอร์

จากรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าสัญญาณออกที่ได้จากเซ็นเซอร์สามารถมีได้มากมายหลายรูปแบบ ซึ่งการนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้งานต้องอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับความต้องการในการแสดงผลของระบบที่ใช้งานอีกด้วย หรือสามารถแสดงระบบกระบวนการพื้นฐานของเซ็นเซอร์อุณหภูมิได้ดังรูปที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



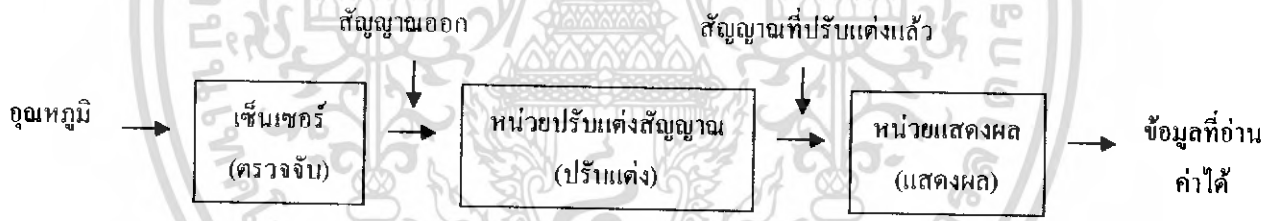
รูปที่ 1.2 ระบบกระบวนการพื้นฐานของ Thermal Diode

1.2 ระบบการวัด

ระบบการวัด ทำหน้าที่แสดงผลของปริมาณสัญญาณออกซึ่งได้จากปริมาณสัญญาณเข้าที่ได้ทำการวัด หลักการทำงานสำคัญของระบบการวัด คือ ระบบการวัดจะทำหน้าที่แสดงผลที่ได้จากการวัดปริมาณจากสัญญาณเข้า

องค์ประกอบที่สำคัญในระบบการวัด ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ส่วนตรวจจับสัญญาณ (sensing unit)
2. ส่วนปรับแต่งสัญญาณ (signal conditioning unit)
3. ส่วนแสดงผล (display unit)



รูปที่ 1.3 องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัดอุณหภูมิ

จากรูปที่ 1.3 อุณหภูมิที่ทำการวัดจะถูกเซ็นเซอร์เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณออกที่สามารถนำไปปรับแต่งหรือแสดงผลต่อไปได้ จากนั้นหน่วยปรับแต่งจะทำหน้าที่ปรับแต่งสภาพสัญญาณออกที่ได้จากเซ็นเซอร์ให้มีรูปแบบเหมาะสมเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานกับหน่วยแสดงผล หลังจากนั้นสัญญาณที่มีการปรับแต่งแล้วจะถูกนำไปแสดงผลให้กับผู้ใช้งานอ่านค่า

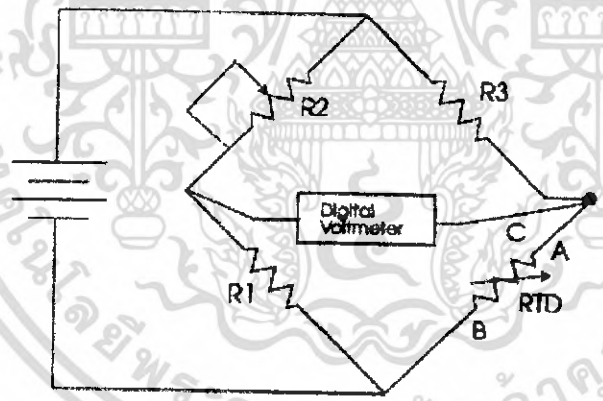
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมินั้น ในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งทำมากจากวัสดุที่แตกต่างกัน และการใช้งานก็แตกต่างกันด้วย โดยเซ็นเซอร์อุณหภูมิแต่ละชนิดจะอาศัยคุณสมบัติของอุณหภูมิกับสัญญาณทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ RTD , Thermister , Thermocouple และ IC Sensor ซึ่งจะเป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติและการใช้งานอย่างคร่าว ๆ เพื่อให้มีความเข้าใจถึงอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ

2.1 Resistance Temperature Detector (RTD)

RTD เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่นำเอาคุณสมบัติพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านไฟฟ้าของวัสดุตัวนำกับอุณหภูมิรอบข้างมาประยุกต์ใช้งาน โดยมากมักนำไปต่อกับวงจรบริดจ์แบบวีตสโตน (Wheatstone bridge circuit) เพื่อพัฒนาทำเป็นเทอร์โมมิเตอร์แบบ electrical resistance ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เทอร์โมมิเตอร์แบบ electrical resistance

ในสภาวะปกติวงจรบริดจ์จะอยู่ในสภาวะสมดุล นั่นคือ มิเตอร์ไม่มีการเบี่ยงเบน แต่เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงแล้วเป็นผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ RTD มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยตามสมการ

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \qquad (2.1)$$

โดยที่ R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส (ohm)

R_t คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิเท่ากับ t องศาเซลเซียส (ohm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ กรณีที่วัสดุตัวนำต่างชนิดกันก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่างกันด้วย

เมื่อ RTD มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากผลของอุณหภูมิ ทำให้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาวะไม่สมดุล และเกิดกระแสไหลผ่านมิเตอร์ทำให้เข็มของมิเตอร์ชี้เบี่ยงเบนไปจากเดิม โดยที่การเบี่ยงเบนของเข็มชี้นั้นจะนำไปปรับเทียบให้มีการแสดงผลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมมิเตอร์แบบ electrical resistance มีให้พบเห็นได้ในอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตอาหารเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหาร หรือ อุตสาหกรรมทางเคมีเพื่อตรวจวัดและทดสอบอุณหภูมิของน้ำยาทางเคมี

2.2 เทอร์มิสเตอร์ (Thermister)

เทอร์มิสเตอร์ เกิดจากการรวมกันของคำสองคำ คือ thermal และ resistor เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิอีกชนิดหนึ่งที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุกับอุณหภูมิ เทอร์มิสเตอร์ทำมาจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับออกไซด์ วัสดุดังกล่าวจะมีคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าได้มากกว่าเมื่อเทียบกับ RTD

ปกติเทอร์มิสเตอร์จะให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิอยู่ในรูปเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์จะเป็นไปตามสมการ

$$R_t = R_0 \exp\ \beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \qquad (2.2)$$

โดยที่ R_t คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิเท่ากับ T องศาเคลวิน

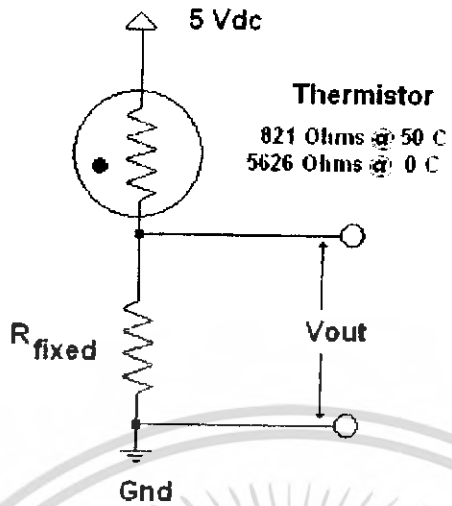
T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยองศาเคลวิน

R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ T_0 องศาเคลวิน

และ β คือค่าคงที่ของเทอร์มิสเตอร์ มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาเทอร์มิสเตอร์ ตลอดจนกรรมวิธีในการผลิตตัวเทอร์มิสเตอร์เอง

รูปทรงของเทอร์มิสเตอร์สามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กโดยที่ยังคงให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในตัวมีค่าสูงอยู่ ซึ่งเป็นผลให้การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เทอร์มิสเตอร์ถูกนำไปใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิในบริเวณที่มีพื้นที่แคบ ๆ ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การต่อเทอร์มิสเตอร์ในวงจรฮาล์ฟบริดจ์

การนำเอาเทอร์มิสเตอร์ไปประยุกต์ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมินั้น มักนิยมต่อกับวงจรบริดจ์ และรูปแบบพื้นฐานที่ง่ายที่สุดคือ การต่อกับวงจรฮาล์ฟบริดจ์ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งหากกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ΔT ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็น ΔR และ V คือแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรจะได้สมการเป็น

$$V_0 = \left(\frac{R_{fixed} \pm \Delta R}{R_{fixed} + R_t \pm \Delta R} \right) V \qquad (2.3)$$

เมื่อ V และ R_{fixed} ต่างเป็นค่าคงที่ จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร V_0 มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงเป็น ΔR ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแรงดันเอาต์พุต V_0 มีค่าแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

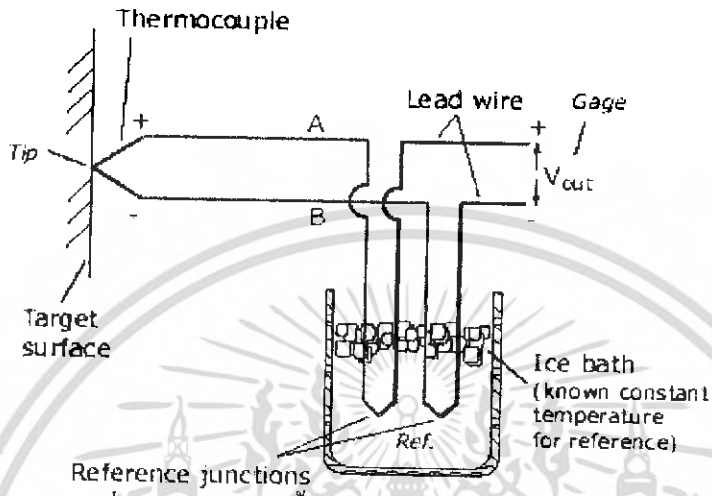
2.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลเป็นเซ็นเซอร์อุณหภูมิซึ่งใช้คุณสมบัติของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า หมายถึง สัญญาณไฟฟ้าซึ่งกำเนิดโดยพลังงานความร้อน เกิดจากการนำเอาโลหะตัวนำต่างชนิดกันสองตัว นำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกันแล้วให้ความร้อนดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e.m.f (electromotive force) ขึ้นที่ปลายอีกด้านหนึ่ง

จากรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล เมื่อนำเทอร์โมคัปเปิลไปยึดติดกับอุปกรณ์ที่ต้องการจะตรวจสอบอุณหภูมิ และตรงจุดอ้างอิงต้องมีการแช่น้ำแข็งเพราะจุดอ้างอิงต้องมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่รู้ค่าได้แน่นอน ดังนั้นเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่จุดตรวจสอบ (Target surface) กับจุดอ้างอิง (Reference) แล้ว จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือแรงดันไฟฟ้า เป็นผลให้มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นในวงจรโดยมีขนาดขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะตัวนำของเทอร์โมคัปเปิลและค่าของอุณหภูมิที่จุดตรวจสอบ



รูปที่ 2.3 ลักษณะพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล

จากรูปที่ 2.3 จะสามารถหาแรงดันเอาท์พุทได้จากสมการ

$$
\begin{aligned}
V_{out} &= \int_{Gage}^{Ref} S_{Lead}(T)\frac{dT}{dx}dx + \int_{Ref}^{Tip} S_A(T)\frac{dT}{dx}dx \\
&\quad + \int_{Tip}^{Ref} S_B(T)\frac{dT}{dx}dx + \int_{Ref}^{Gage} S_{Lead}(T)\frac{dT}{dx}dx \\
&= \int_{T_{Ref}}^{T_{Tip}} S_A(T)dT + \int_{T_{Tip}}^{T_{Ref}} S_B(T)dT \\
&= \int_{T_{Ref}}^{T_{Tip}} [S_A(T) - S_B(T)]dT
\end{aligned}
\qquad (2.4)
$$

โดยที่ V_{out} คือ แรงดันเอาท์พุทของเทอร์โมคัปเปิล มีหน่วยเป็นโวลท์

T_{Tip} คือ ค่าอุณหภูมิที่จุดตรวจสอบ

T_{Ref} คือ ค่าอุณหภูมิที่จุดอ้างอิง

S_A , S_B , S_{Lead} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck ของวัสดุ A , B และสายตัวนำ ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าแปรตามอุณหภูมิ

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck นั้นจะเป็นคงที่เฉพาะ ถ้าวัสดุที่ใช้ต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck ก็จะมีค่าต่างกันด้วย ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Material	Seebeck Coeff.	Material	Seebeck Coeff.	Material	Seebeck Coeff.
Aluminum	3.5	Gold	6.5	Rhodium	6.0
Antimony	47	Iron	19	Selenium	900
Bismuth	-72	Lead	4.0	Silicon	440
Cadmium	7.5	Mercury	0.60	Silver	6.5
Carbon	3.0	Nichrome	25	Sodium	-2.0
Constantan	-35	Nickel	-15	Tantalum	4.5
Copper	6.5	Platinum	0	Tellurium	500
Germanium	300	Potassium	-9.0	Tungsten	7.5

ตารางที่ 2.1 ตางรางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck ของวัสดุต่าง ๆ

จากสมการ 2.4 อาจจะให้ทำสมการนั่นง่ายขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ Seebeck ถ้ากำหนดให้มีค่าคงที่ได้ ฉะนั้น จะได้สมการอุณหภูมิที่จุดตรวจสอบคือ

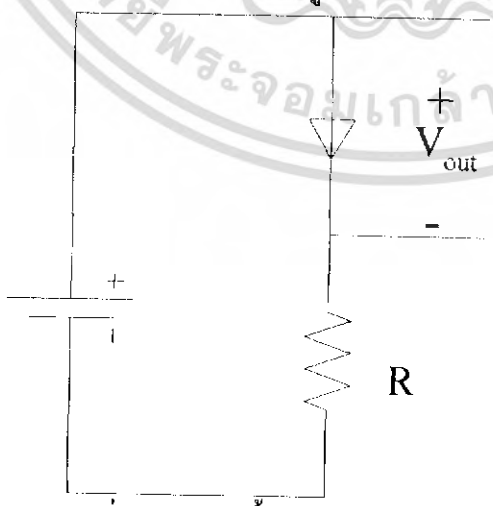
$$V_{\text{out}} = (S_A - S_B)(T_{\text{Tip}} - T_{\text{Ref}})$$

$$\Rightarrow T_{\text{Tip}} = T_{\text{Ref}} + \frac{V_{\text{out}}}{S_A - S_B} \qquad (2.5)$$

เทอร์โมคัปเปิลสามารถนำไปใช้วัดอุณหภูมิของโลหะ ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยความแม่นยำในการวัดขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะตัวนำที่นำมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิล แต่ทั่วไปจะมีความแม่นยำน้อยกว่าการวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบ electrical resistance

2.4 ไดโอดตรวจวัดอุณหภูมิ (Thermal Diode)

เซ็นเซอร์ชนิดนี้จะมีขนาดเล็ก และมีความเป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งจากเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถสร้างเซ็นเซอร์ชนิดนี้ได้ง่าย และมีราคาถูก



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานการใช้ Thermal Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างวงจรสำหรับ Thermal Diode เซ็นเซอร์ชนิดนี้จะใช้การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อพีและเอ็น ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ให้กับรอยต่อ ในวงจรจะมีแหล่งจ่ายแรงดัน เพื่อจ่ายพลังงานให้วงจรรวมทำงาน และมีความต้านทานปรับค่าได้ เพื่อปรับแต่ง V_{out} ให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน และถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนไป กระแสก็จะเปลี่ยนไปด้วย เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อพีและเอ็นเปลี่ยนไป

จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของเซ็นเซอร์อุณหภูมิชนิดต่างที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่าเซ็นเซอร์แต่ละชนิดถึงแม้ว่าจะใช้ตรวจวัดอุณหภูมิเหมือนกัน แต่คุณสมบัติก็แตกต่างกัน ซึ่งก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไปด้วย

เทอร์มิสเตอร์จะมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีย่านการวัดแคบ ส่วนเทอร์โมคัปเปิลจะให้ผลตอบสนองค่อนค้างไม่เป็นเชิงเส้น มีย่านการวัดกว้าง แต่สัญญาณเอาท์พุทที่ได้มีขนาดเล็กมาก ทั้งยังต้องการจุดอ้างอิงในการวัดอีกด้วย ในขณะที่ RTD จะมีผลตอบสนองที่มีความเป็นเชิงเส้นแต่ยังคงมีขนาดของสัญญาณเอาท์พุทเล็กมากเช่นกัน ส่วนเซ็นเซอร์ชนิดใช้ไดโอด จะต้องการแหล่งจ่ายพลังงาน มีย่านการวัดน้อย แต่มีความเป็นเชิงเส้นสูง และราคาไม่แพง ซึ่งสามารถสรุปข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ข้อดี	ข้อเสีย
RTD	- มีเสถียรภาพที่สุด - มีความเที่ยงตรงที่สุด - มีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าเทอร์โมคัปเปิล	- ราคาแพง - ต้องการแหล่งจ่ายกระแส - ค่า ΔR น้อย - ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ - เกิดความร้อนสะสม
Thermistor	- ให้ผลตอบสนองรวดเร็ว - ให้สัญญาณเอาท์พุทสูง	- ไม่เป็นเชิงเส้น - ย่านการวัดอุณหภูมิแคบ - แตกหักได้ง่าย - ต้องการแหล่งจ่ายกระแส - เกิดความร้อนสะสม
Thermocouple	- แข็งแรง ทนทาน - ย่านการวัดอุณหภูมิกว้าง - ราคาไม่แพง - กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าได้เอง - การใช้งานง่าย - สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง	- ไม่เป็นเชิงเส้น - สัญญาณเอาท์พุทมีขนาดเล็ก - ต้องการสัญญาณอ้างอิง - ไม่มีเสถียรภาพ - ให้ผลตอบสนองช้ามาก
Thermal Diode	- มีความเป็นเชิงเส้นสูง - ให้สัญญาณเอาท์พุทสูง - ราคาไม่แพง - สามารถวัดอุณหภูมิในวงจรรวมได้ง่าย	- ย่านการวัดอุณหภูมิน้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส - ให้ผลตอบสนองช้า - ต้องการแหล่งจ่ายพลังงาน - เกิดความร้อนสะสม - มีรูปแบบการใช้งานที่จำกัด

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงข้อดีและข้อเสียของเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของไดโอดชนิดต่างๆ ซึ่งสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำ ไดโอดจะสร้างได้จากสารกึ่งตัวนำหลายรูปแบบ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง

1. ไดโอดจากรอยต่อพีและเอ็น
2. ซีเนอร์ไดโอด
3. ไดโอดจากรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ หรือ ช็อตคีย์ไดโอด
4. ไดโอดแปล่งแสง หรือ LED

ซึ่งไดโอดทั้ง 4 ชนิดนี้จะมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่แตกต่างกันไป รวมทั้งคุณสมบัติก็แตกต่างกันด้วยเช่นกัน และไดโอดชนิดต่าง ๆ ข้างต้นล้วนเกิดจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิค (Extrinsic semiconductor) ทั้งสิ้น

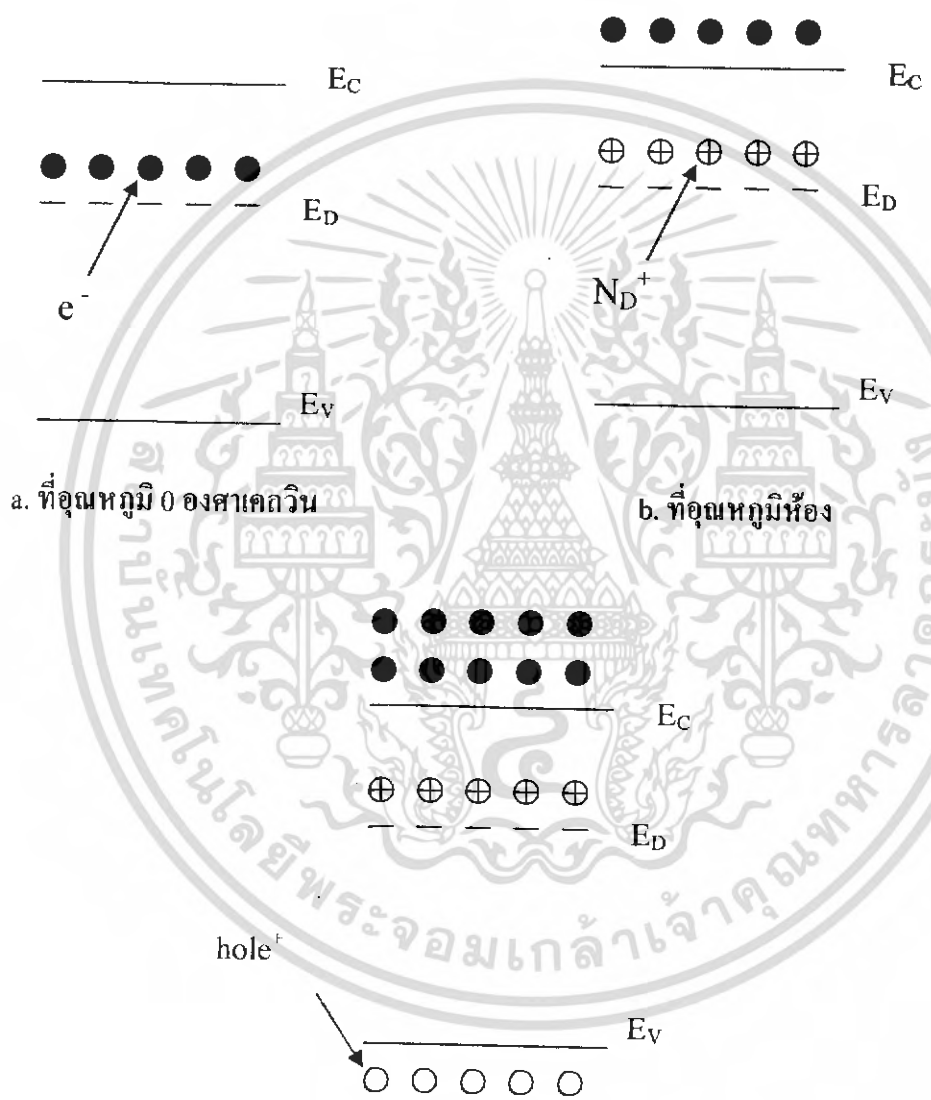
3.1 ผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค

สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค คือสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการเติมอะตอมสารเจือให้แก่ซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และสารกึ่งตัวนำชนิดพีขึ้น

โดยในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะมีอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ อะตอมผู้ให้แต่ละอะตอม ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องมาก ๆ อิเล็กตรอนจะไม่สามารถหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ ดังแถบพลังงานที่แสดงไว้ในรูป 3.1 (A) แต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ประมาณอุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีพลังงานมากพอที่จะสามารถทำให้หลุดออกอะตอมได้ และทิ้งไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ (N_D^+) เอาไว้ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดเป็นอิเล็กตรอนอิสระแล้วก็หมายความว่าเป็นพาหะที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งที่อุณหภูมิห้องนี้ จะมีการไอออไนซ์อะตอมผู้ให้เกือบทุกอะตอม นั่นคือที่อุณหภูมิห้องนี้ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้ ($n \cong N_D^+ \cong N_D$) ดังแถบพลังงานที่แสดงไว้ในรูป 3.1 (B) ขณะที่มีการไอออไนซ์อะตอมผู้ให้ ก็มีการไอออไนซ์อะตอมของสารกึ่งตัวนำบางอะตอม ซึ่งจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น แต่การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้จะเกิดน้อยมากเมื่อเทียบกับการอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์อะตอมผู้ให้ เพราะต้องใช้พลังงานมากในการไอออไนซ์อะตอมของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมาก และมีโฮลเป็นพาหะส่วนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

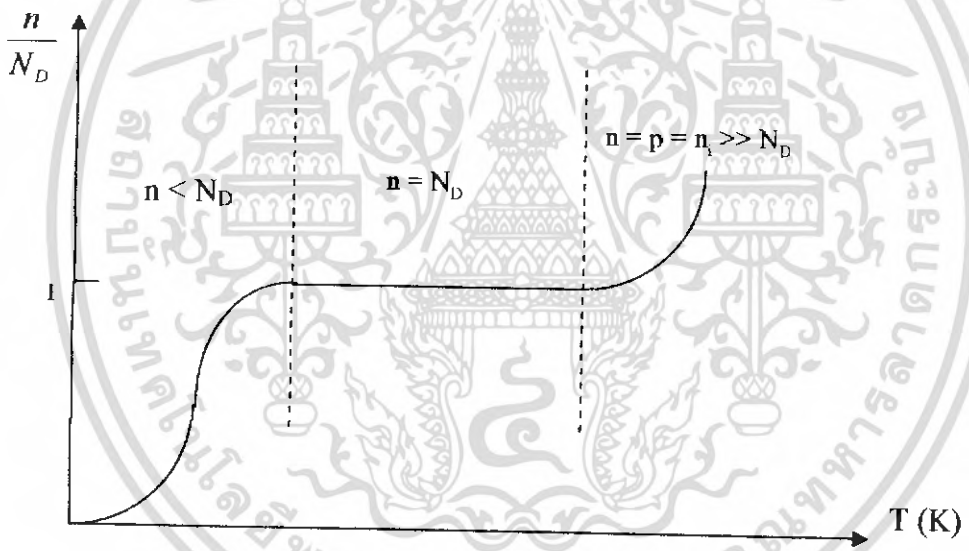
อย่างไรก็ตาม หากอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิห้องมาก ๆ การไอออไนซ์อะตอมของสารกึ่งตัวนำจะมีมากขึ้นอย่างมาก จนมากกว่าอิเล็กตรอนที่ไอออไนซ์จากอะตอมสารเจือ ($p = n \cong n_i \rangle\rangle N_D$) การไอออไนซ์อะตอมของสารกึ่งตัวนำนอกจากจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่แถบนำไฟฟ้าแล้วยังทำให้เกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ด้วย ซึ่งลักษณะแบบนี้จะคล้ายกับสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค ดังแถบพลังงานที่แสดงไว้ในรูป 3.1 (C)



รูปที่ 3.1 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิคที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

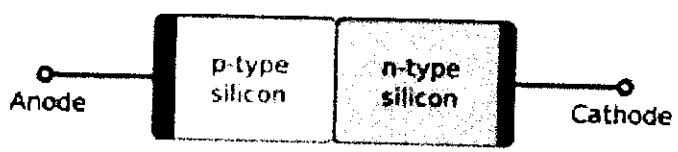
ในสภาวะต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำอีกทรินซิคที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้น อาจแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติได้ง่าย ๆ ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแกนตั้งจะแสดงอัตราส่วนของอิเล็กตรอนต่ออะตอมสารเจือ ซึ่งจะง่ายต่อความเข้าใจ ว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ อิเล็กตรอนจะมีจำนวนน้อยกว่าอะตอมสารเจือ เพราะมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดจากอะตอมสารเจือได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานมากพอที่จะหลุดจากอะตอมสารเจือได้ทุกอะตอม ฉะนั้นช่วงนี้ $n = N_D$ หรือ $\frac{n}{N_D} = 1$ ถึงแม้ว่าจะมีอะตอมของสารกึ่งตัวนำสามารถไอออไนซ์ได้ แต่ก็มีจำนวนน้อยมาก และช่วงที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ อะตอมของกึ่งตัวนำจะสามารถไอออไนซ์มากขึ้นเรื่อย ๆ ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนที่เกิดจากอะตอมสารเจือ $n = p = n_i >> N_D$ ซึ่งคุณสมบัติขณะนี้จะคล้ายกับสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค ดังกราฟ



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในซิลิคอนชนิดเอ็นกับอุณหภูมิ

3.2 ไดโอดจากรอยต่อพีและเอ็น (P-N Diode)

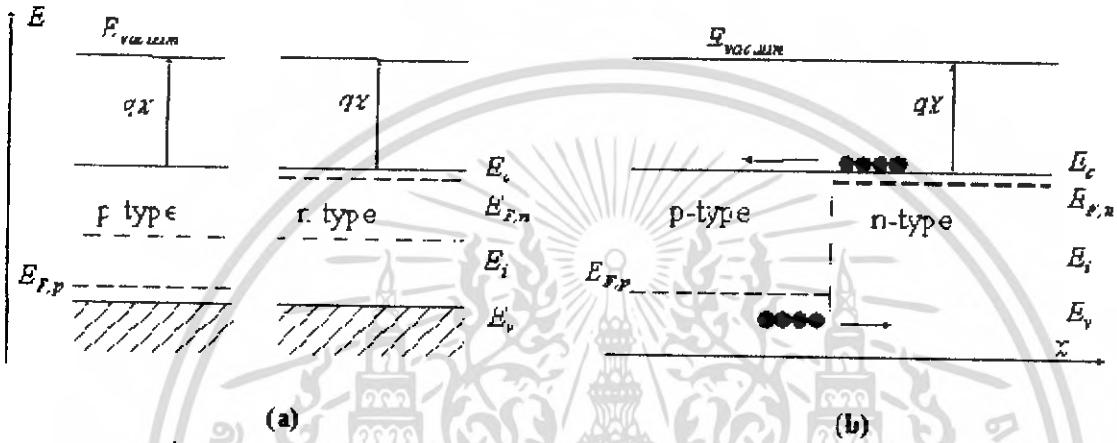
ไดโอดชนิดนี้เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะไดโอดแบบรอยต่อพีและเอ็น

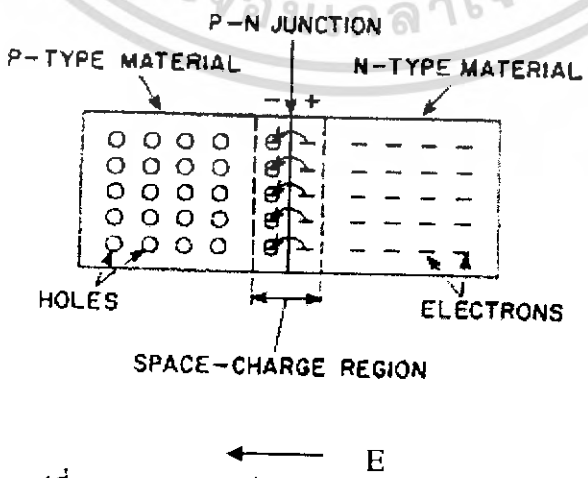
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะแถบพลังงานของสารทั้งสองชนิดแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 รูปที่ 3.4 (a) เป็นลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีระดับเฟอร์มิเข้าใกล้แถบวาเลนซ์ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีระดับเฟอร์มิเข้าใกล้แถบนำไฟฟ้า และในรูปที่ 3.4 (b) แสดงถึงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น เนื่องจากระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองไม่เท่ากัน เมื่อสารทั้งสองเริ่มสัมผัสกัน จึงมีอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นจะเคลื่อนที่เข้าไปด้านพี และโฮลจากด้านพีจะเคลื่อนที่เข้าไปด้านเอ็น เพื่อเป็นการถ่ายเทประจุให้ระดับเฟอร์มิเท่ากัน



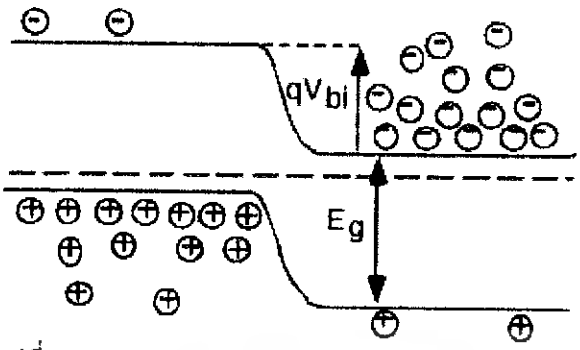
รูปที่ 3.4 (a) แสดงลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี
(b) ลักษณะรอยต่อพี-เอ็นเมื่อเริ่มสัมผัส

เมื่อการถ่ายเทพาหะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนถึงสภาวะสมดุลความร้อน นั่นคืออิเล็กตรอนไม่สามารถแพร่เข้าไปทางด้านพีได้อีก และโฮลไม่สามารถแพร่เข้าไปด้านเอ็นได้อีก เนื่องจากขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปด้านพีจะทิ้งไอออนบวกของอะตอมผู้ให้เอาไว้ และขณะที่โฮลเคลื่อนที่เข้าไปด้านเอ็นจะทิ้งไอออนลบของอะตอมผู้รับเอาไว้ นั่นก็หมายความว่าจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งมีทิศทางชี้จากด้านเอ็นไปทางด้านพี และเมื่อสนามไฟฟ้านี้มีค่ามากพอที่หยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ ก็จะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รอยต่อพีเอ็นในขณะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แถบพลังงานขณะสภาวะสมดุลความร้อน

เมื่อเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ ก็หมายความว่ามีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ซึ่งแถบพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 จะเห็นว่ามีศักย์ภายในเกิดขึ้น ซึ่งศักย์ภายในนี้จะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไม่ให้ข้ามไปทางด้านพี และต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลไม่ให้ข้ามไปทางด้านเอ็น สมการของศักย์ภายในแสดงได้ดังนี้

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \qquad (3.1)$$

เมื่อ V_{bi} คือศักย์ภายใน

k คือค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์

T คืออุณหภูมิ

q คือประจุของอิเล็กตรอน

N_A คือความหนาแน่นอะตอมผู้รับ

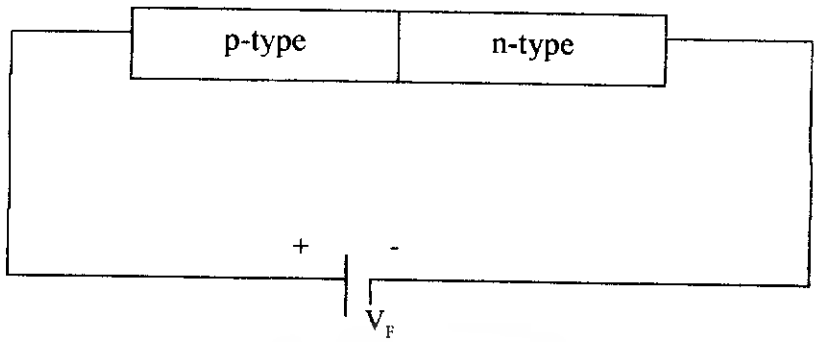
N_D คือความหนาแน่นอะตอมผู้ให้

n_i คือความหนาแน่นอินทรินซิค

3.2.1 รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

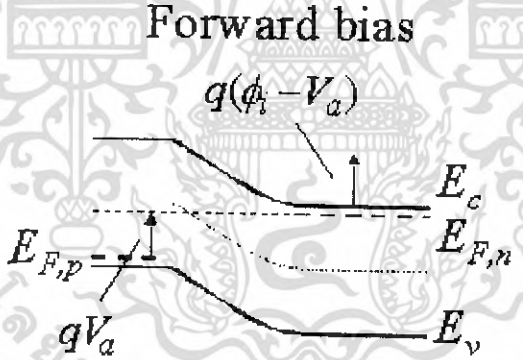
การไบอัส เป็นการใส่แรงดันที่ขั้วด้านนอกของสารพีและเอ็นที่ประกอบกันเป็นรอยต่อ รอยต่อพีเอ็นขณะที่ยังไม่ได้รับแรงดันไบอัส จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อ เพราะสนามไฟฟ้าภายในจะต้านการเคลื่อนที่ของพาหะไว้ แต่การให้ไบอัสตรงจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อได้ การให้ไบอัสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงการให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อพีเอ็น

การไบอัสตรงเป็นการต่อวงจรไฟฟ้าให้ศักย์ไฟฟ้าบวกกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี และศักย์ไฟฟ้าลบกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การให้ไบอัสแบบนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าเดิมที่รอยต่อในสภาวะสมดุลความร้อน นั่นคือสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง ก็หมายความว่ามีอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นสามารถเคลื่อนที่ข้ามไปด้านพี และก็มีโฮลจากด้านพีสามารถเคลื่อนที่ข้ามไปด้านเอ็นได้ ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงถึงแถบพลังงานขณะไบอัสตรง



รูปที่ 3.8 แสดงแถบพลังงานขณะไบอัสตรง

จากรูปที่ 3.7 ขณะได้รับไบอัสตรงจะทำให้ศักย์ภายในลดลงเป็น $V_{bi} - V_a$ โดยที่ V_a คือแรงดันไบอัสตรง ซึ่งการที่ศักย์ภายในโดนหักล้างโดยแรงดันไบอัสตรงทำให้ความชันของแถบพลังงานที่บริเวณปลอดพาหะเดิมลดลง นั่นก็คืออิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อได้นั่นเอง จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็นขณะให้ไบอัสตรงสามารถหาได้จากสมการ

$$I = I_0(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1) \qquad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $$I_0 = qAn_i^2(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D}) \quad (3.3)$$

เมื่อ I_0 คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

L_n คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

L_p คือ ระยะการแพร่ของโฮล

จากสมการที่ 3.2 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V = (\frac{kT}{q})\ln(\frac{I}{I_0} + 1) \quad (3.4)$$

สมการที่ 3.4 นี้จะใช้เป็นสมการหลักในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอุณหภูมิ จะเห็นว่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดพีเอ็นจะแปรผันตามอุณหภูมิ และกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ โดยปกติแล้วถือว่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับจะมีค่าคงที่ แต่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป กระแสอิ่มตัวย้อนกลับก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เนื่องจากกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าแปรผันตามความหนาแน่นอินทรินซิคตามสมการที่ 3.3 และความหนาแน่น อินทรินซิคก็จะแปรผันตามอุณหภูมิ ดังนั้นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับก็จะมีแปรผันตามอุณหภูมิด้วย ซึ่งความหนาแน่นอินทรินซิคหาได้จากสมการ

$$n_i = KT^{\frac{3}{2}}\exp(-\frac{E_g}{2kT}) \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.3 นี้ยังสามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ เมื่อแทน n_i^2 จากสมการที่ 3.5 ในสมการที่ 3.3 จะได้

$$I_0 = qAKT^3\exp(-\frac{E_g}{kT})(\frac{D_n}{L_n} + \frac{D_p}{L_p}) \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 นี้จะเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กระแสอิ่มตัวย้อนกลับจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นหากย้อนกลับดูสมการที่ 3.4 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น I_0 จะเพิ่มขึ้น และมีผลให้เทอม $\ln(\frac{I}{I_0}+1)$ ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดพีเอ็นลดลงตามไปด้วย หากนำสมการที่ (3.2) และ (3.6) จะสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสไบอัสกับอุณหภูมิได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$I \propto \exp(\frac{-E_g}{kT})\exp(\frac{eV_a}{kT}) \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) หากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เราอาจเขียนอัตราส่วนของกระแสไดโอดที่อุณหภูมิทั้งสองได้ดังนี้

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\exp(-E_g/kT_2)\exp(eV_{a2}/KT_2)}{\exp(-E_g/kT_1)\exp(eV_{a1}/KT_1)} \tag{3.8}$$

หากทำการไบอัสกระแสคงที่ให้แก่ไดโอด ทำให้ $I_1 = I_2$ จะได้ว่า

$$\frac{E_g - eV_{a2}}{kT_2} = \frac{E_g - eV_{a1}}{kT_1} \tag{3.9}$$

จากสมการที่ (3.9) จะเห็นว่า ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะแปรผกผันกัน และเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง

หรืออาจจะเขียนสมการที่ 3.3 ให้อยู่ในรูปพาหะส่วนน้อยของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดได้ จาก $n.p = n_i^2$ และ $p_n = n_i^2 / N_D$ และ $n_p = n_i^2 / N_A$ ดังนั้นแทนค่า n_i^2 ในสมการที่ 3.3 จะได้

$$I_0 = qA(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p}) \tag{3.10}$$

เมื่อ n_p คืออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย

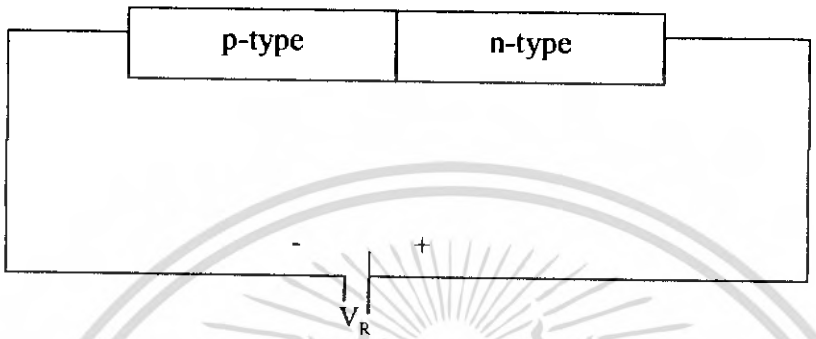
p_n คือโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย

สมการที่ 3.10 นี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอะตอมของสารกึ่งตัวนำจะถูกไอออไนซ์ ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นการไอออไนซ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น เมื่อเกิดโฮลขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลจึงเป็นพาหะส่วนน้อย (p_n) และถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี การไอออไนซ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำจะทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นกัน เมื่อเกิดอิเล็กตรอนขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อย (n_p) ดังนั้นขณะที่ให้ไบอัสตรงแก่ไดโอดพีเอ็นจะทำให้การเกิดพาหะส่วนน้อยของสารกึ่งตัวนำทั้งสองด้านเพิ่มขึ้น และพาหะส่วนน้อยนี้จะทำเกิดกระแสการดริฟท์ขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากการไบอัส เมื่อกระแสการดริฟท์เพิ่มขึ้นซึ่งกระแสดริฟท์ที่เพิ่มขึ้นนี้จะเป็นการเพิ่มกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ สำหรับรอยต่อพีเอ็นซิลิคอนความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับทางอุดมคติจะเพิ่มขึ้นโดยประมาณสี่เท่าทุก ๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส หากกระแสอิ่มตัวย้อมกลับเพิ่มขึ้นเป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าลดลง ตามสมการที่ (3.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
72160

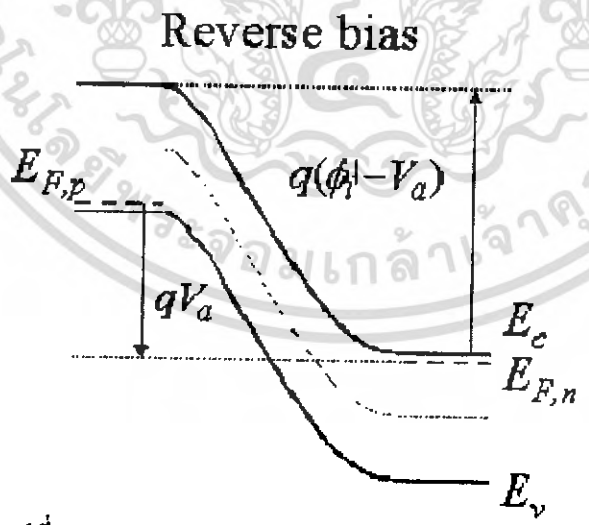
3.2.2 รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

การไบอัสย้อนกลับของรอยต่อพีเอ็นนั้น คือการที่ให้ศักย์ไฟฟ้าลบแก่ด้านพี และให้ศักย์ไฟฟ้าบวกแก่ด้านเอ็น การให้ไบอัสย้อนกลับแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.9 แสดงการให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อพีเอ็น

การให้ไบอัสแบบนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ซึ่งมีทิศทางชี้จากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าขณะสภาวะสมดุลความร้อน ทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ซึ่งก็หมายความว่าอิเล็กตรอนและโฮลจะไม่สามารถเคลื่อนข้ามรอยต่อได้ ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างรอยต่อพีเอ็น ลักษณะแถบพลังงานขณะให้ไบอัสย้อมกลับแก่รอยต่อพีเอ็นแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



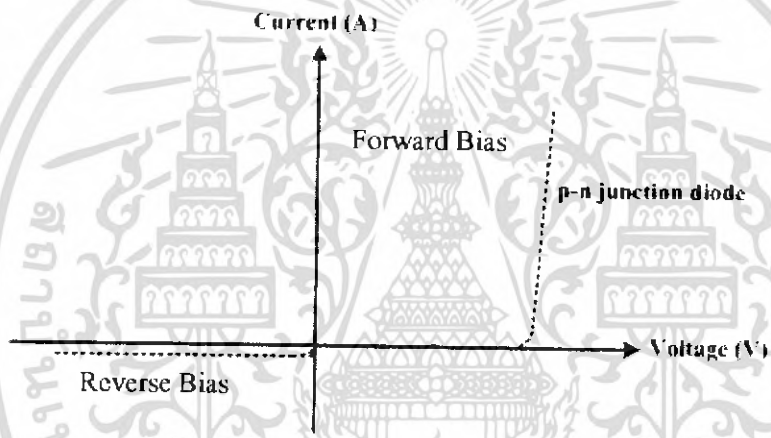
รูปที่ 3.10 แสดงแถบพลังงานขณะไบอัสย้อนกลับ

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าขณะให้ไบอัสย้อมกลับแก่รอยต่อพีเอ็น จะทำให้ศักย์ภายในของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $V_{bi} + V_a$ โดยที่ V_a คือแรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งการที่ศักย์ภายในมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นโดยแรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้ความชันของแถบพลังงานที่บริเวณปลอดพาหะเดิมเพิ่มขึ้น นั่นก็คืออิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อได้ การให้ไบอัสย้อนกลับจึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อ อย่างไรก็แล้วแต่ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับก็ยังมีพาหะส่วนน้อยของสารกึ่งตัวนำในแต่ละข้างเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปได้ ผลของพาหะส่วนน้อยที่เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อนี้ทำให้เกิดกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วจะมีค่าคงที่

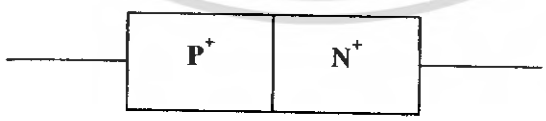
จากคุณสมบัติขณะการให้ไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นจะเป็นอุปกรณ์ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว คือกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านรอยต่อได้ในขณะให้ไบอัสตรง และกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อได้ขณะให้ไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นลักษณะกราฟระหว่างกระแสและแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น

3.3 ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode)

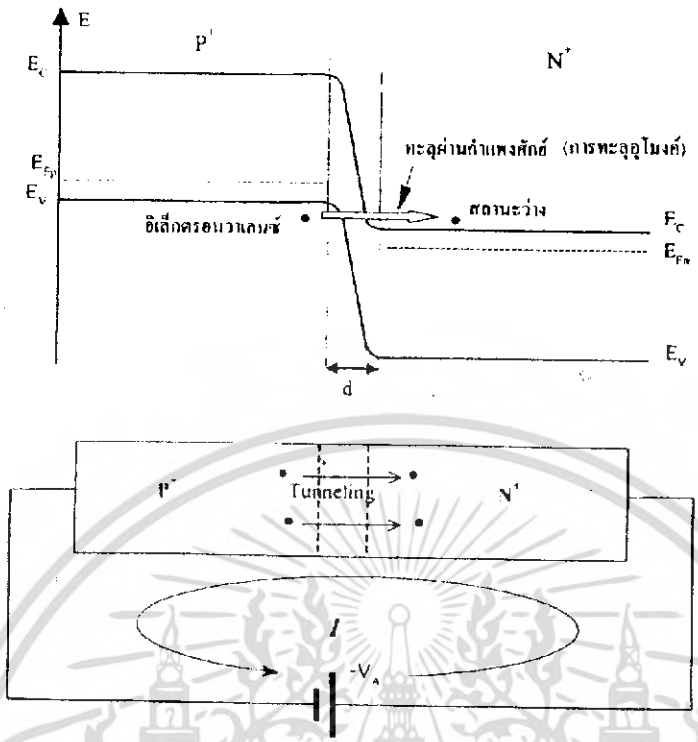
ซีเนอร์ไดโอด คือไดโอดที่เกิดจากรอยต่อพีเอ็นที่มีการเติมอะตอมสารเจือด้วยความเข้มข้นสูง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะโครงสร้างของซีเนอร์ไดโอด

ซีเนอร์ไดโอดนั้นหากได้รับไบอัสตรงจะมีคุณสมบัติเหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น แต่หากได้รับไบอัสย้อนกลับจะเกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ขึ้น การเติมอะตอมสารเจือด้วยความเข้มข้นสูงจะทำให้บริเวณปลอดพาหะแคบ ซึ่งจะอธิบายได้โดยแถบพลังงาน ดังรูปที่ 3.13

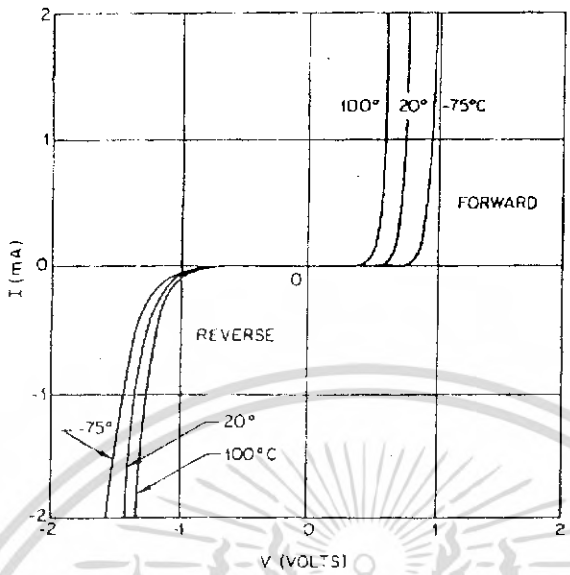
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แถบพลังงานของซีเนอร์ไดโอดและลักษณะการไบอัสย้อนกลับ

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะนั้นแคบมาก เมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับเพียงเล็กน้อยก็สามารถเกิดการทะลุผ่านกำแพงศักย์ได้ (Tunneling effect) โดยจากแถบพลังงานจะเห็นว่าอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่อยู่ด้านพีและใกล้กับบริเวณปลอดพาหะ จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์กำแพงศักย์ได้ ซึ่งอิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนไปแถบนำไฟฟ้าด้านเอ็น ซึ่งมีสถานะพลังงานว่างอยู่มาก การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านทะลุอุโมงค์นี้ทำให้เกิด กระแสทะลุอุโมงค์ (Tunneling current) ขึ้น ซึ่งถ้าให้ไบอัสย้อนกลับมากขึ้น กระแสทะลุอุโมงค์ก็มากขึ้นด้วย และเพิ่มขึ้นเร็วมาก นอกจากนี้แล้ว ยังพบว่าหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แรงดันพังทลายแบบซีเนอร์ก็จะลดลงด้วย และจากที่กล่าวมาแล้วว่าหากเป็นการให้ไบอัสตรงกับซีเนอร์ไดโอดจะมีคุณสมบัติเหมือนไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น แต่หากให้ไบอัสย้อนกลับ ซีเนอร์ไดโอดจะมีแรงดันพังทลายน้อยกว่าไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ดังนั้นจะได้กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิต่าง ๆ

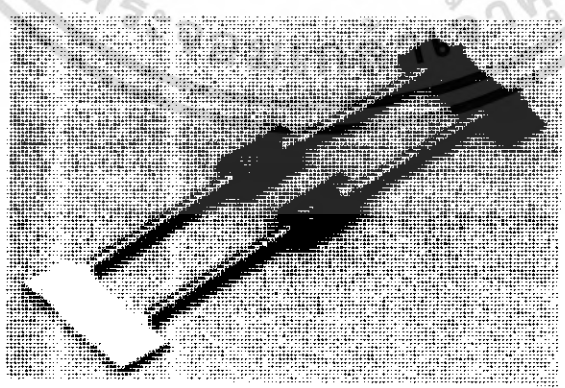
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่าง ๆ

3.4 ช็อตต์คีย์ไดโอด (Schottky Diode)

ในปัจจุบันนี้ สินค้าทางอิเล็กทรอนิกส์มีการแข่งขันกันมาก และสิ่งที่แข่งขันกันมาก ก็คือ ความเร็วในการทำงาน ไม่ว่าจะสร้างอุปกรณ์อะไรขึ้นมาก็มักจะมีคุณสมบัติของความเร็วพ่วงเข้ามาด้วยเสมอ จึงต้องมีการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถใช้ที่ความเร็วสูงได้ และไดโอดที่นิยมใช้ในงานที่ต้องการความเร็วสูงก็คือ ช็อตต์คีย์ไดโอดนอกจากนั้นยังนิยมนำช็อตต์คีย์ไดโอดไปใช้ในวงจรสวิตช์ หรือวงจรในความถี่สูงได้อีกด้วย



รูปที่ 3. 15 ช็อตต์คีย์ไดโอดที่ใช้งานกันทั่ว ๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช็อตต์คีย์ไดโอดนั้นจะมีรอยสัมผัสที่แตกต่างจะไดโอดแบบรอยสัมผัสพี-เอ็น คือเป็นไดโอดที่มีรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำนี้จะมี 2 แบบคือ " รอยสัมผัสแบบโอห์มมิค " และ " รอยสัมผัสแบบเรคติไฟร์ " รอยสัมผัสแบบโอห์มมิคจะกล่าวได้อีกอย่างว่ารอยสัมผัสที่กระแสไฟฟ้าจะสามาถไหลผ่านได้ทั้ง 2 ทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง ส่วนรอยสัมผัสแบบเรคติไฟร์นี้จะมีกระแสจะไหลผ่านได้ทางเดียว โดยรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำนี้จะเป็นรอยสัมผัสแบบไหนนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหรือสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างให้เป็นรอยสัมผัส

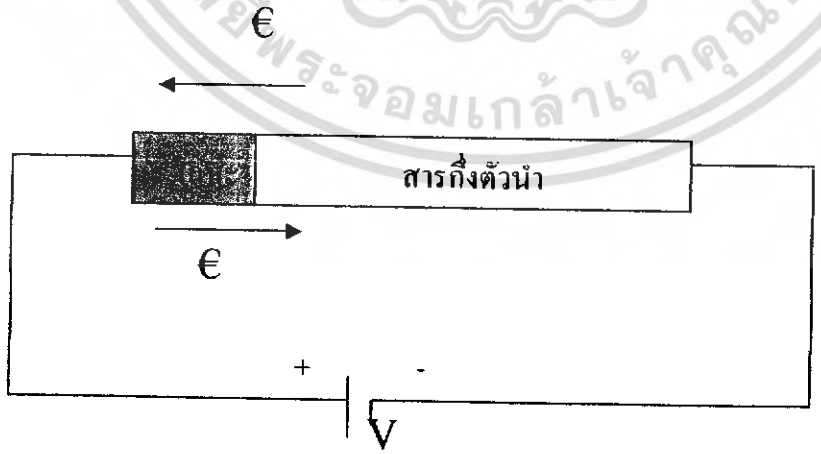
โดยทั่ว ๆ ไปช็อตต์คีย์ไดโอดนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบเรคติไฟร์เพราะว่าชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้สร้างช็อตต์คีย์ไดโอดมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบเรคติไฟร์ หรือจะกล่าวคือค่าฟังก์ชั่นงานของโลหะจะมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ($\Phi_M > \Phi_S$) โดยจะพิจารณาจากแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

3.4.1 การให้ไบอัสแก่ช็อตต์คีย์ไดโอด

การให้ไบอัสแต่ช็อตต์คีย์ไดโอดนั้นจะคล้ายกับการให้ไบอัสกับไดโอดที่สร้างจาก p – n junction เพียงแต่ให้ด้านโลหะเปรียบเสมือนด้านสารเจือชนิดพี ซึ่งช็อตต์คีย์ไดโอดจะสามารถนำกระแสได้ทิศทางเดียวหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่ารอยสัมผัสเรคติไฟร์ ซึ่งจะสามารถทำกระแสได้ในกรณีไบอัสตรง และจะไม่สามารถนำกระแสได้ในกรณีไบอัสย้อนกลับ

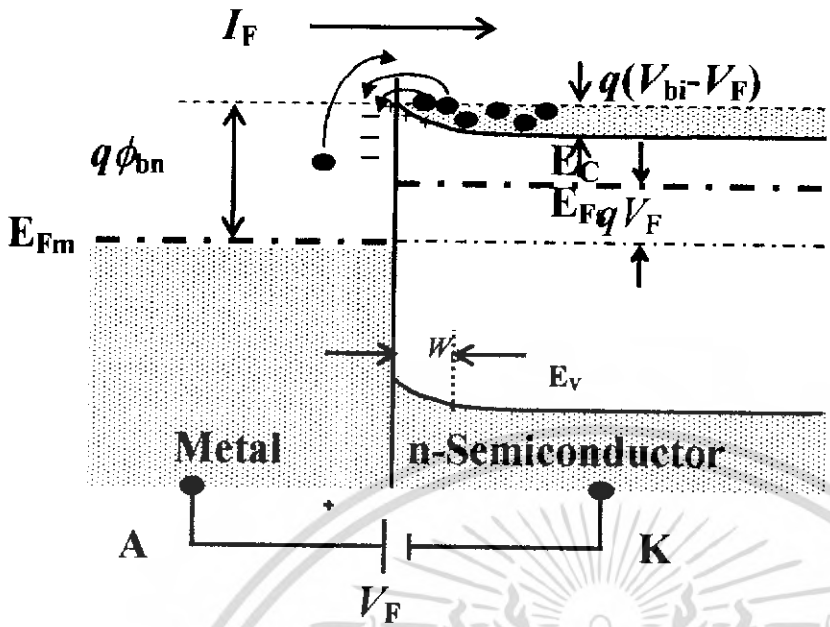
3.4.1.1 กรณีไบอัสตรง (Forward Bias)

กรณีไบอัสแบบนี้จะให้ศักดาบวกที่ด้านโลหะและศักดาลบที่ด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้กำแพงศักย์ (V_B) ลดลง ซึ่งก็หมายถึงสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ(ϵ_0)ลดลงด้วย เพราะสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัส(ϵ_0)จะมีทิศสวนทางกับสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะที่มีอยู่เดิม ทำให้อิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำสามารถแพร่ข้ามรอยสัมผัสมายังด้านโลหะได้มากขึ้น



รูปที่ 3.16 การให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

กำแพงศักย์เดิมขณะสมดุลความร้อนเท่ากับ qV_{bi} แต่ในขณะได้รับไบอัสตรงกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงเป็น $q(V_{bi}-V_F)$ ซึ่ง V_F ก็คือแรงดันขณะให้ไบอัสตรง จากรูปจะเห็นได้ว่ามีอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งหมายถึงกระแสไหลสามารถไหลได้ขณะได้รับไบอัสตรง และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับไบอัสย้อนตรงจะลดลงซึ่งดูได้จากสมการ

$$W = [\,2\epsilon\,(V_{bi} - V_F)/\,qN_D\,]^{1/2} \qquad (3.11)$$

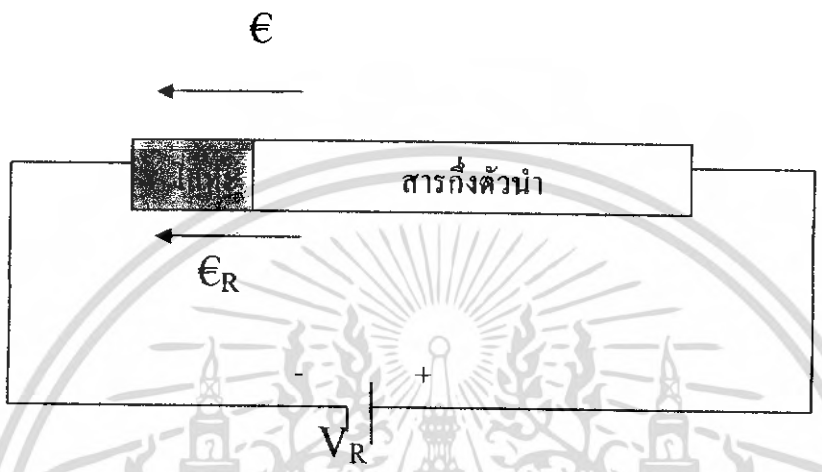
จากสมการจะเห็นได้ว่าค่า W มีค่าลดลงจากสภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งก็หมายความว่าอิเล็กตรอนจะยิ่งถูกสนามไฟฟ้าผลักให้สามารถเคลื่อนที่ข้ามจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำได้มากกว่าในสภาวะสมดุลความร้อน ก็จะมีกระแสไหลมากกว่าในสภาวะสมดุลความร้อนนั่นเอง

3.4.1.2 กรณีไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias)

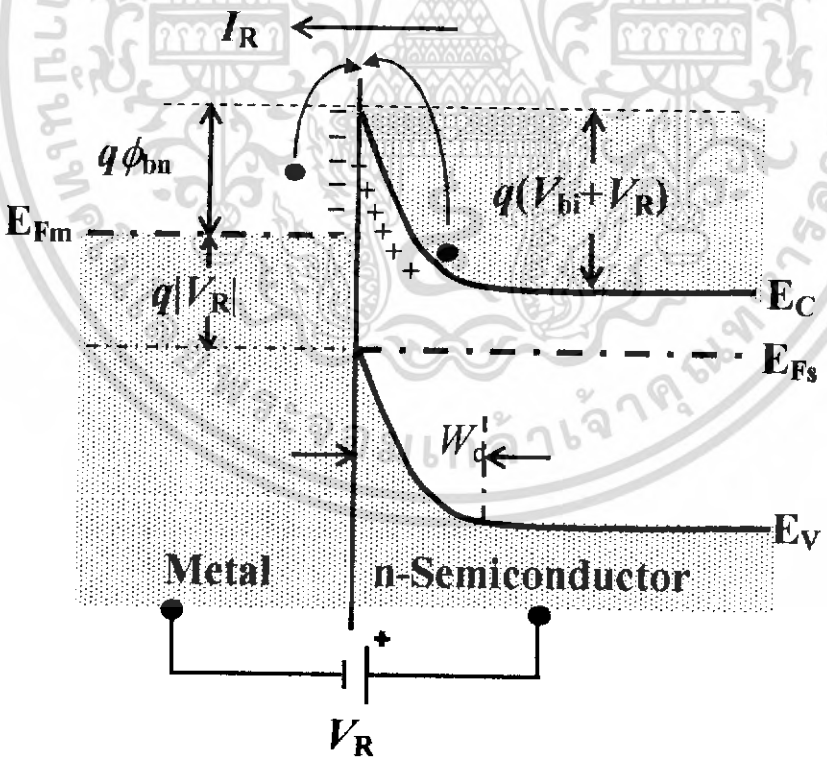
การให้ไบอัสแบบนี้จะให้ศักดาลบที่ด้านโลหะและศักดาบวกที่ด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นผลให้กำแพงศักย์ (V_{bi}) เพิ่มขึ้น ซึ่งก็หมายถึงสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ(ϵ_0)เพิ่มขึ้นด้วย เพราะสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัสย้อนกลับ(ϵ_R)มีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะที่มีอยู่เดิม ทำให้อิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถแพร่เข้าไปทางด้านโลหะได้ เพราะกำแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นมาก แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนบางส่วนแพร่จากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีกระแสเกิดขึ้นซึ่งไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ แต่กระแสนี้จะมีค่าน้อยมากและมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัสที่ให้กับช็อตต์คีย์ไดโอด เรียกกระแสนี้ว่ากระแสรั่วไหล (Leakage Current)



รูปที่ 3.18 การให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำแพงศักย์เดิมขณะสมดุลความร้อนเท่ากับ qV_{bi} แต่ในขณะได้รับไบอัสย้อนกลับกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $q(V_{bi}+V_F)$ ซึ่ง V_R ก็คือแรงดันที่ป้อนขณะให้ไบอัสย้อนกลับ จากรูปจะเห็นได้ว่าอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ยากมาก เพราะกำแพงศักย์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งหมายถึงกระแสไหลไม่สามารถไหลได้ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับไบอัสย้อนกลับจะเพิ่มขึ้นซึ่งดูได้จากสมการ

$$W = [2\epsilon (V_{bi} + V_R)/qN_D]^{1/2} \qquad (3.12)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่า W มีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งก็หมายความว่าอิเล็กตรอนจะยิ่งถูกสนามไฟฟ้าผลักให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำได้

3.4.2 กระแสที่ไหลในช็อตต์คีย์ไดโอด

กระแสที่ไหลในรอยสัมผัสช็อตต์คีย์โดยหลักแล้วจะมาจากพาหะส่วนมาก (Majority carrier) ซึ่งกระแสที่ไหลนั้นจะเกิดจากสาเหตุหลัก 4 ประการ คือ

- Thermionic emission คือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำข้ามกำแพงศักย์เข้าสู่โลหะ เรียกว่า กระแสที่เกิดจากการแผ่กระจายอนุภาคโดยความร้อน
- Tunnelling current คือกระแสที่เกิดจากการทะลุผ่านกำแพงศักย์ของประจุไฟฟ้า เรียกว่า กระแสทะลุผ่าน
- Recombination current คือกระแสที่ไหลในบริเวณปลอดพาหะ เรียกว่า กระแสการรวมตัว
- Minority carrier current คือกระแสของการฉีดพาหะส่วนน้อยซึ่งคือการฉีดของโฮล เรียกว่า กระแสพาหะส่วนน้อย

โดยทั่วไปช็อตต์คีย์ไดโอดจะแพร่สารเจือผู้ให้ในปริมาณน้อย เพื่อให้สามารถทนแรงดันพังทลายได้สูง ดังนั้นความกว้างของกำแพงศักย์จึงไม่แคบพอที่จะทำให้เกิดกระแสทะลุผ่านได้ รวมทั้งกระแสรวมตัวและกระแสพาหะข้างน้อยก็จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นกระแสที่สำคัญที่ไหลข้ามรอยสัมผัสช็อตต์คีย์ก็คือ กระแสที่เกิดจากการแผ่กระจายโดยความร้อน (Thermionic emission)

ทฤษฎีของ Thermionic emission จะสมมุติให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่ากำแพงศักย์ จึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกำแพงศักย์ไปได้ ซึ่งความหนาแน่นกระแสจะแสดงได้ดังสมการ

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right)\left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1\right] \qquad (3.13)$$

โดย T คือ ค่าสัมบูรณ์ของอุณหภูมิ (องศาเคลวิน : K)

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน (คูลอมบ์ : C)

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann (J / K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_a คือ แรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับรอยสัมผัส (โวลท์ : V)

A^* คือค่าคงที่ของ Richardson = $4\pi m^* k^2 / h^3$ ซึ่งขึ้นกับมวลยังผลและชนิดของสารกึ่งตัวนำ ($A / cm^2.K^3$)

ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสจะมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสตามสมการ

$$J = I / A \tag{3.14}$$

โดย I คือ กระแส (แอมป์ : A)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยสัมผัส (ตารางเซนติเมตร : cm^2)

และจากสมการที่ (3.13) จะได้ค่า J_0 ดังสมการ

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \tag{3.15}$$

ค่า J_0 คือ ค่ากระแสอิ่มตัว (Saturation current) ซึ่งมีค่าคงที่

จากสมการที่ (3.13) ในขณะที่รอยสัมผัสได้รับไบอัสตรงจะได้ $\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) >> 1$ เพราะฉะนั้นความหนาแน่นกระแสขณะรอยสัมผัสได้รับไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ

$$J_F = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right)\exp\left(\frac{qV_F}{k_B T}\right) \tag{3.16}$$

และในขณะที่รอยสัมผัสได้รับไบอัสย้อนกลับ $\exp\left(\frac{-qV_R}{kT}\right) << 1$ ความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นจะเป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$J_R = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \tag{3.17}$$

จากสมการที่ (3.17) อาจกล่าวได้ว่ากระแสนี้คือกระแสรั่วไหล ซึ่งถ้าไม่คิดว่า $\exp\left(\frac{-qV_R}{kT}\right) << 1$ กระแสรั่วไหลก็จะมีค่าขึ้นกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ถ้าไบอัสย้อนกลับยิ่งมีค่ามาก กระแสรั่วไหลก็จะมีค่ามากตามไปด้วย แต่ในที่นี้จะพิจารณาว่า $\exp\left(\frac{-qV_R}{kT}\right) << 1$ ฉะนั้นจากสมการที่ (3.17) กระแสรั่วไหลจะขึ้นกับกำแพงศักย์ช็อตต์คีย์ ซึ่งกำแพงศักย์ช็อตต์คีย์ยิ่งมากกระแสอิ่มตัวก็จะยิ่งมีค่าน้อย และนั่นก็หมายความว่ามีกระแสรั่วไหล (Leakage current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยลงนั่นเอง ฉะนั้นเราอาจลดค่ากระแสรั่วไหลได้โดยการเลือกชนิดโลหะที่เหมาะสม เพราะค่ากำแพงศักย์ช็อตต์คีย์จะมีค่าต่างกันไปในแต่ละคู่สัมผัสของชนิดโลหะและชนิดสารกึ่งตัวนำ

ในการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อช็อตต์คีย์ไดโอดนั้นจะคล้ายกับกรณีของรอยต่อแบบพี-เอ็นกล่าวคือ คือ ถ้าพิจารณาจากสมการ

$$J = A^{*}T^{2}\exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_{B}T}\right)\left[\exp\left(\frac{qV_{A}}{kT}\right)-1\right]$$

จากสมการค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหล

$$J_{0} = A^{*}T^{2}\exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_{B}T}\right)$$

แล้วนำค่าสมการความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวแทนลงไปในสมการจะได้ว่า

$$J = J_{0}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right]$$

ทำการจัดรูปของสมการ

$$V = \left(\frac{kT}{q}\right)\ln\left(\frac{J}{J_{0}}+1\right) \qquad (3.18)$$

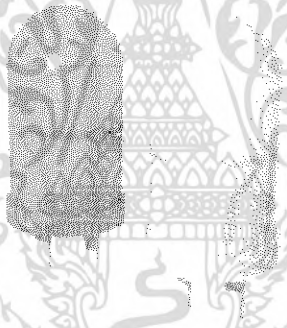
จะเห็นว่าหลังจัดรูปของสมการแล้วจะได้สมการแรงดันคล้ายกับสมการแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ต่างกันตรงที่อัตราส่วน $\frac{I}{I_{0}}$ และ $\frac{J}{J_{0}}$ ดังนั้นจะทำให้สามารถพิจารณาแบบเดียวกันกับรอยต่อแบบพี-เอ็นได้ โดยจะเห็นทางด้านขวาของสมการเป็นค่าคงที่ยกเว้นค่าของอุณหภูมิกับค่าของความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจากสมการของความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวจะแปรผันกับค่า T^{2} ซึ่งจากเงื่อนไขนี้เองเมื่อนำค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวกลับลงไปแทนในสมการแรงดันแรงดันที่ตกคร่อมแล้วจะเห็นว่าเทอม $\ln\left(\frac{J}{J_{0}}+1\right)$ จะมีค่าลดลงอย่างมากเนื่องจากค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวแปรกับอุณหภูมิยกกำลังสองทำให้มีผลมากกว่าอุณหภูมิ ซึ่งจะทำแรงดันที่ได้ตามสมการลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนกับกราฟเอ็กซ์โปเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากตรงนี้เองจะทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซ็อตต์คีย์ไดโอดนั้นจะมีความไวกับอุณหภูมิมาก ซึ่งความไวนี้มากจนทำให้ค่าแรงดันที่ได้ออกมานั้นไม่ตรงกับความเป็นจริง จึงจะพิจารณาได้ว่าซ็อตต์คีย์ไดโอดไม่เหมาะสมแก่การนำมาใช้สร้างเป็นไดโอดตรวจวัดอุณหภูมิ

3.5 ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)

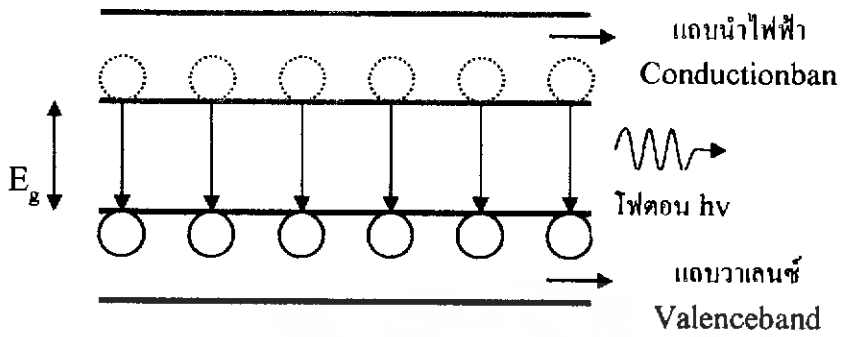
การสื่อสารในยุคปัจจุบันต้องการความรวดเร็ว แม่นยำและถูกต้องการสื่อสารด้วยแสงจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญอีกทั้งยังนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางด้วยเหตุนี้เองจึงได้มีการประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางด้านแสงมาใช้งาน อุปกรณ์ที่ใช้กันในปัจจุบันโดยมากจะมาจากสิ่งประดิษฐ์ทางด้านแสงพื้นฐาน เช่น โฟโตไดโอด เลเซอร์ไดโอด ไดโอดเปล่งแสง อื่น ๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงไดโอดเปล่งแสง



รูปที่ 3.20 ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)

ไดโอดเปล่งแสงเป็นสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงได้ โดยในการเปล่งแสงของไดโอดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการปลดปล่อยพลังงานจากระดับที่สูงกว่าลงไปอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า เช่น อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าตายหรือปลดปล่อยพลังงานออกมาเพื่อลดระดับลงไปที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งในการปลดปล่อยพลังงานนี้จะปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเมื่อโฟตอนนี้มีความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นได้ ก็จะเห็นว่าไดโอดเปล่งแสงได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การปลดปล่อยหรือคายพลังงานของอิเล็กตรอน

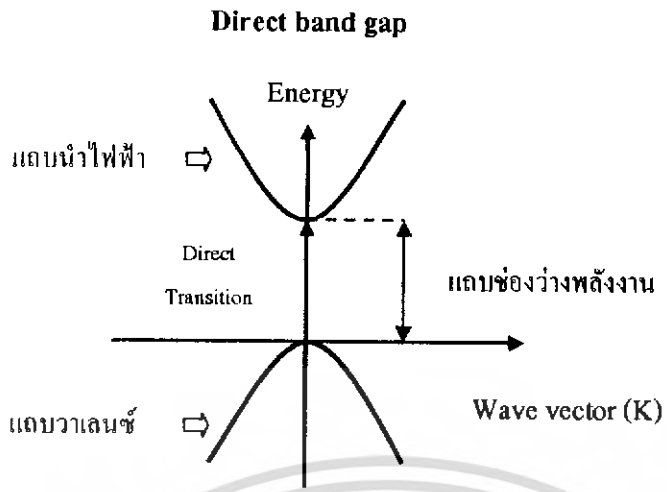
โดยความยาวคลื่นของโฟตอนนั้นจะถูกกำหนดจากขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap :E_g) ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีค่าขนาดช่องว่างพลังงานไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อที่ทำให้ไดโอดเปล่งแสงให้ตามองเห็นได้ จะต้องมีการเลือกสารที่จะนำมาเป็นไดโอดเปล่งแสงด้วย

3.5.1 ช่องแถบตรง (Direct Band Gap) และช่องแถบไม่ตรง (Indirect Band Gap)

นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของช่องแถบตรง (Direct Band Gap) และช่องแถบไม่ตรง (Indirect Band Gap) ด้วย

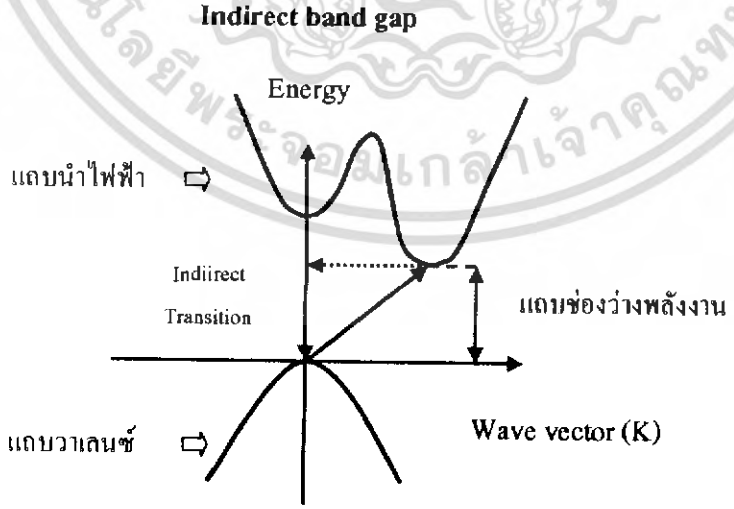
ใน Direct Band Gap นั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าหรือมีการปลดปล่อยพลังงานจากจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าไปยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์นั้น อิเล็กตรอนจะทำการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานขึ้นหรือลงได้โดยตรงและเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงานและกฎอนุรักษ์โมเมนตัม ซึ่งในการที่อิเล็กตรอนทำการเปลี่ยนระดับพลังงานในการตกลงมาจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาตามความกว้างของช่องว่างพลังงาน (E_g) และพลังงานที่ปลดปล่อยออกมานี้จะเป็นพลังงานโฟตอนที่อยู่ในรูปของแสงสีต่าง ๆ ได้ ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเป็นช่องแถบตรง

ใน Indirect Band Gap นั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าหรือมีการปลดปล่อยพลังงานจากจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าไปยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์นั้น อิเล็กตรอนจะไม่สามารถทำการเปลี่ยนระดับพลังงานในการขึ้นหรือลงได้ตรง ๆ โดยจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัมก่อนและจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัมให้มาอยู่ในจุดที่ต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน (ที่ K = 0) ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานเพื่อลงมาและในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานตอนขึ้นก็จะคล้าย ๆ กัน ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัมนี้เองจะทำให้ไม่เป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัม และพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานในรูปของความร้อน จึงไม่มีโฟตอนที่อยู่ในรูปของแสงสีเกิดขึ้น ดังรูป

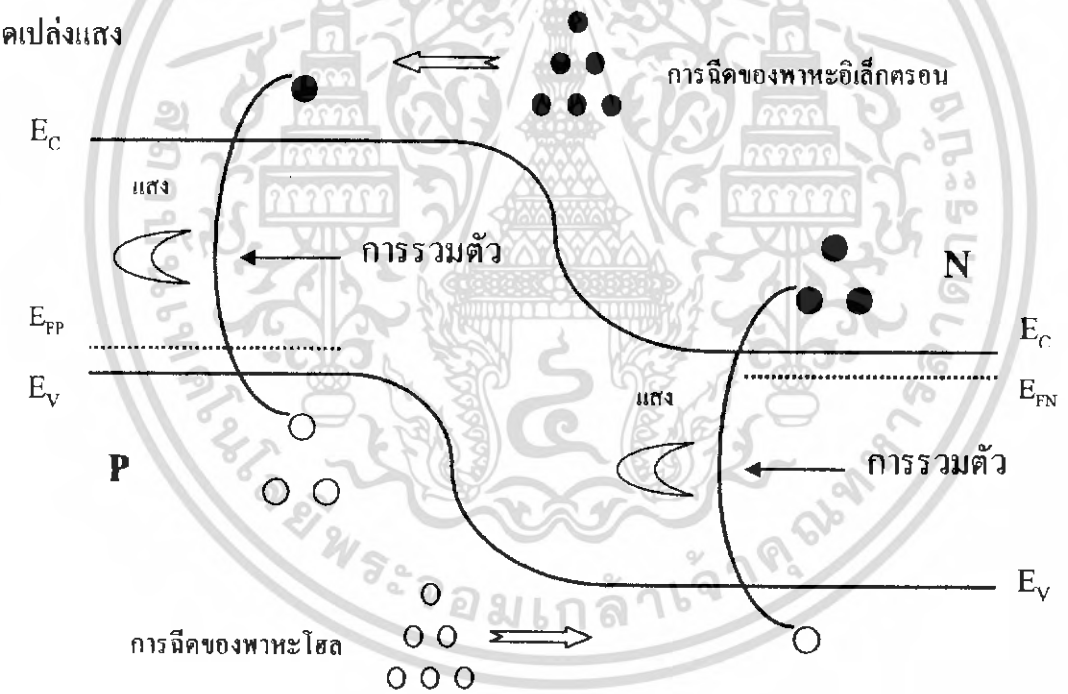


รูปที่ 3.23 การปลดปล่อยหรือคายพลังงานของสารที่มีคุณสมบัติช่องแถบไม่ตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงกล่าวได้ว่าสารกึ่งตัวนำที่ควรจะนำมาใช้ทำเป็นไดโอดเปล่งแสง (LED) ควรเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด " Direct Band Gap Semiconducter " และจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่มีลักษณะเรียกว่า " Direct Transition " และสารกึ่งตัวนำที่ไม่เหมาะสมแก่การนำมาใช้ทำเป็นไดโอดเปล่งแสง (LED) คือสารกึ่งตัวนำชนิด " Indirect Band Gap Semiconducter "

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิด " Direct Band Gap Semiconducter " มาทำเป็นไดโอดเปล่งแสงแล้วทำให้แรงดันไบอัสตรงนั้น จะทำให้อิเล็กตรอนและโฮลถูกฉีดข้ามรอยต่อไปยังด้านตรงข้าม ซึ่งในระหว่างที่มีการฉีดของพาหะดังกล่าวนี้ ในบริเวณปลอดพาหะจะมีกระบวนการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้น กล่าวคืออิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยพลังงานในรูปของโฟตอนที่เป็นแสงสีต่าง ๆ จากแถบนำไฟฟ้าแล้วตกลงมารวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์และนี่เป็นกระบวนการรวมตัวที่เกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะนี้ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะถูกเรียกว่า " Injection Electroluminescence " และผลที่ตามมาก็คือไดโอดเปล่งแสง



รูปที่ 3.24 ลักษณะของแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงที่มีคุณสมบัติของช่องแถบตรง (Direct Band Gap)

จึงจะกล่าวได้ว่าในการสร้างไดโอดเปล่งแสง (LED) สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้สร้างควรจะเป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบช่องแถบตรง (Direct Band Gap) และทั้งซิลิคอนกับเยอรมันเนียมนั้นเป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบช่องแถบไม่ตรง (Indirect Band Gap) จึงไม่เหมาะแก่การนำมาใช้สร้างเป็นไดโอดเปล่งแสง (LED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากที่จะคำนึงถึงสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรงยังต้องคำนึงถึงตัวแปรอีกอย่างหนึ่งคือช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap :E_g) โดยปกติแสงที่สามารถมองเห็นได้จะอยู่ในช่วงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 – 700 นาโนเมตร (อยู่ในช่วง สีแดง – สีม่วง) ดังนั้นการที่จะเห็นว่าไดโอดเปล่งแสง (LED) จึงต้องมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วงนี้ แต่จากการที่ความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับช่องว่างพลังงานดังสมการ

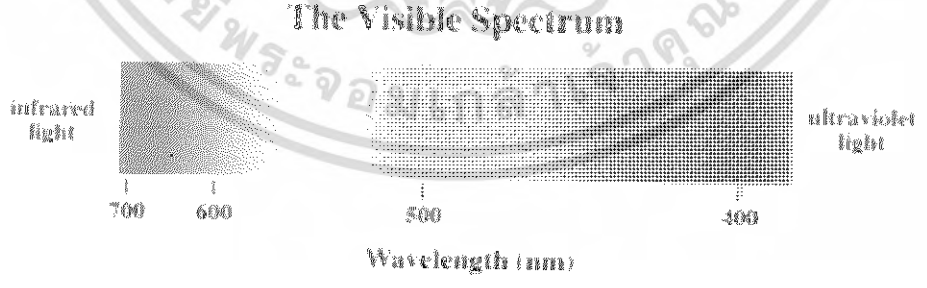
$$E_g = 1240 / \lambda \text{ (nm)} \qquad (3.16)$$

แทนค่า $\lambda = 400$ และ 700 ลงในสมการจะทำให้ได้ค่า

$E_g = 3.17$ และ 1.77 eV ตามลำดับ

หรือจะกล่าวได้ว่าค่าช่องว่างพลังงานที่มีค่าที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นคือค่าช่องว่างพลังงานตั้งแต่ 1.77 – 3.17 eV จากค่าช่องว่างพลังงานที่คำนวณได้จะสามารถบอกได้ว่าสารกึ่งตัวนำที่ควรจะนำมาสร้างไดโอดเปล่งแสง (LED) ควรจะมีค่าช่องว่างพลังงานตั้งแต่ 1.77 – 3.17 eV และจะเห็นว่าทั้งซิลิคอนและเยอรมันเนียมมีค่าช่องว่างพลังงาน น้อยเกินไป จึงไม่เหมาะสมแก่การนำมาสร้างเป็นไดโอดเปล่งแสง (LED)

ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติตามนี้มีจำนวนน้อยมาก ทั้งซิลิคอนและเยอรมันเนียมที่นิยมนำมาสร้างสารกึ่งตัวนำจึงไม่เหมาะสม จึงได้มีการนำเอาสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบมารวมกัน เพื่อให้ได้แสงสีต่าง ๆ และมีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น GaAsP จะให้แสงสีแดง , GaP จะให้แสงสีเขียว



Color Infrared: 0.7 - 0.9 μm Red: 0.620 - 0.7 μm
Orange: 0.592 - 0.620 μm 0.578 - 0.592 μm
Green: 0.500 - 0.578 μm Blue: 0.446 - 0.500 μm Violet: 0.4 - 0.446 μm

รูปที่ 3.25 ย่านของแสงที่สามารถมองเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในทางด้านของรอยต่อจะมีรอยต่อแบบพี-เอ็น ซึ่งพิจารณาเหมือนกับไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นแบบธรรมดาทั่ว ๆ ไป

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) ไดโอดเปล่งแสงนั้นมีรอยต่อแบบพี-เอ็น จึงใช้วิธีการพิจารณาแบบไดโอดแบบดังที่กล่าวมาแล้วข้างบนคือจะเริ่มจากพิจารณาจากสมการ

$$V = (\frac{kT}{q})\ln(\frac{I}{I_0}+1)$$

จากทางด้านขวาของสมการจะเห็นได้ว่าค่าของตัวแปรต่าง ๆ มีค่าคงที่นอกจากค่าของอุณหภูมิและค่าของกระแสรั่วไหล (I_0) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงค่าของกระแสรั่วไหลก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยสามารถพิจารณาจากสมการ

$$I_0 = qAn_i^2(\frac{D_n}{L_n N_A}+\frac{D_p}{L_p N_D})$$

จากสมการจะเห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิค่าของความหนาแน่นอินทรินซิคก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นอินทรินซิคก็จะเพิ่มขึ้นตาม โดยค่าความหนาแน่นอินทรินซิคนั้นจะมีค่าแปรตามกับอุณหภูมิดังสมการ

$$n_i = KT^{\frac{3}{2}}\exp(-\frac{E_g}{2kT})$$

จากนั้นแล้วนำค่าความหนาแน่นอินทรินซิคไปแทนลงในสมการค่ากระแสรั่วไหล เพื่อหาค่ากระแสรั่วไหล จึงค่อยนำค่ากระแสรั่วไหลไปแทนลงในสมการแรงดันไบอัสนั้นจะส่งผลให้ค่าแรงดันที่วัดคร่อมขาของไดโอดเปล่งแสงมีค่าลดลง เพราะค่าของกระแสรั่วไหลมีผลมากกว่าผลของอุณหภูมิ ซึ่งจะเหมือนกับกรณีของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ดังที่กล่าวไปแล้วข้างบน

แต่จะมีสิ่งที่ต่างกับรอยต่อพี-เอ็นคือสารกึ่งตัวนำที่ใช้มาสร้างไดโอด โดยปกติสารกึ่งตัวที่นิยมนำมาใช้สร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น คือ ซิลิคอนและเยอรมันเนียม ส่วนสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้สร้างไดโอดเปล่งแสง จะเป็นพวกสารประกอบสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไดโอดทั้งสองชนิดต่างกันแค่สารกึ่งตัวนำที่ใช้ ซึ่งจะมีความกว้างแถบช่องว่างพลังงานต่างกัน เช่น ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าความกว้างแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.17 eV เยอรมันเนียมมีความกว้างแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 0.74 eV และสารประกอบสารกึ่งตัวนำ GaP มีค่าความกว้างแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.23 eV และด้วยค่าความกว้างแถบช่องว่างพลังงานนี้เอง ถ้านำไปพิจารณาตามสมการ

$$n_i = KT^{\frac{3}{2}} \exp(-\frac{E_g}{2kT})$$

ถ้าพิจารณาตามสมการที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ๆ จะเห็นว่าค่าอื่น ๆ นั้นเป็นค่าคงที่ ซึ่งถ้าเกิดมีการเปลี่ยนค่าความกว้างแถบช่องว่างพลังงานมากขึ้น เมื่อนำไปแทนลงในสมการข้างบนจะทำให้ค่าในเทอม $\exp(-\frac{E_g}{2kT})$ ลงอย่างมาก ทำให้ค่าความหนาแน่นอินทรินซิคลดลงด้วย ซึ่งถ้าค่าความหนาแน่นอินทรินซิคมีค่าน้อย ๆ เมื่อนำไปยกกำลังสองก็จะได้ค่าน้อยตามไปด้วย และเมื่อนำลงไปแทนในสมการค่ากระแสรั่วไหลก็จะทำให้ได้ค่าของกระแสรั่วไหลน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งด้วยเงื่อนไขนี้เองจะทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าค่ากระแสรั่วไหลนั้นจะไม่มีผลกระทบมากเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือจะกล่าวได้ว่ามีความไวต่ออุณหภูมิไม่ดีนัก

จากที่ได้กล่าวไปแล้ว จะทำให้สามารถสรุปได้ว่าถ้าทำการเปรียบเทียบระหว่างไดโอดที่เป็นรอยต่อแบบพี-เอ็น ธรรมดากับไดโอดเปล่งแสง ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นนั้นจะมีความไวต่ออุณหภูมิมากกว่าไดโอดเปล่งแสง

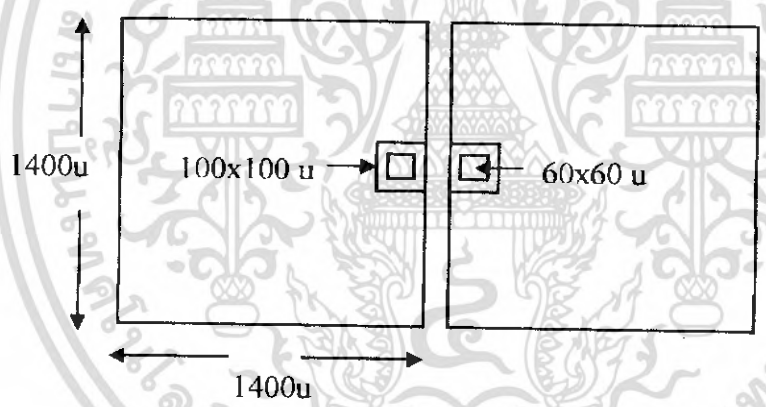
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การสร้างเซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบใช้ไดโอด

กระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นมีดังนี้คือ

ขั้นตอนแรกคือการออกแบบมาส์ค (Mask) เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นต้นแบบในการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น โดยการออกแบบมาส์คนี้จะใช้โปรแกรม CorrelDraw ช่วยในการออกแบบ

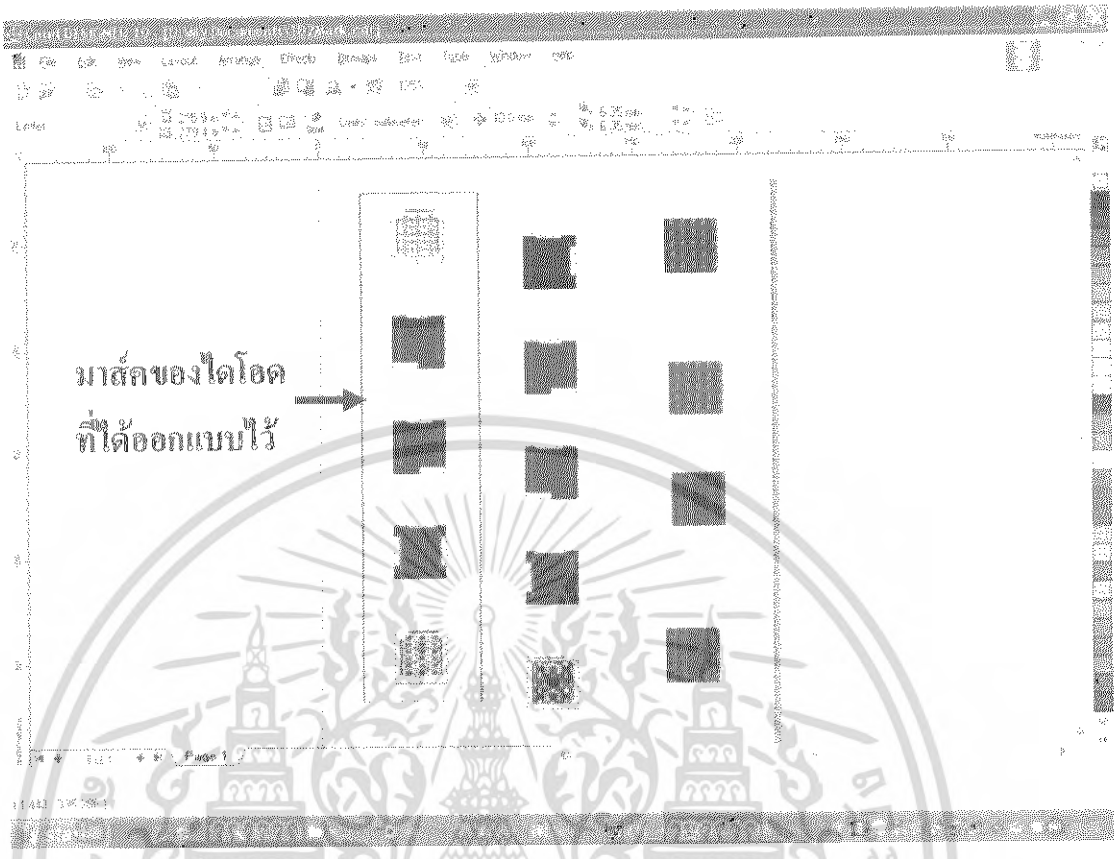
โดยในการออกแบบนั้น จะต้องกำหนดขนาดส่วนต่างๆของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นที่จะสร้างก่อน ซึ่งจะให้ขนาดของสารเจือพีและเอ็นมีขนาด 100x100 u และขนาดของช่องคอนแท็ค 60x60 u โดยจะมีขนาดของอลูมิเนียม 1400x1400 u ดังรูป



รูปที่ 4.1 ขนาดของไดโอดที่ได้ออกแบบ

หลังจากได้กำหนดขนาดไว้แล้ว ก็จะนำไปออกแบบโดยใช้ โปรแกรม CorrelDraw ซึ่งในการสร้างพี-เอ็นไดโอดนั้นจะต้องมีทั้งหมด 4 มาส์ค ประกอบไปด้วยมาส์คแรกคือการแพร่สารเจือชนิดพี มาส์คที่ 2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น มาส์คที่ 3 การเปิดช่องคอนแท็ค มาส์คที่ 4 การแพร่อลูมีเนียม ซึ่งจะเห็นได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 มาส์คทั้ง 4 อันที่ได้ออกแบบในโปรแกรม Correl Draw

ซึ่งมาส์คที่ออกแบบนี้ก็จะมีขนาด 1x1 ตารางนิ้ว ซึ่งแผ่นซิลิคอนที่มีขนาด 1x1 ตารางนิ้วก็จะสามารถสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นได้ 18 ตัว โดยหลังจากที่ได้ทำการออกแบบเสร็จก็จะนำไปยิงฟิล์ม เพื่อที่จะเอาฟิล์มที่ได้มาติดลงกับกระจกเพื่อที่จะได้เป็นกระจกมาส์คอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป

หลังจากที่ได้กระจกมาส์คก็จะเริ่มเข้าสู่กระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น โดยจะเริ่มจากกระบวนการเตรียมแผ่นซิลิคอน

4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน

ในการที่จะสร้างไดโอดนั้นเริ่มแรกต้องมีการเตรียมแผ่นซิลิคอนที่ใช้ในการสร้างแผ่น ผลึกซิลิกอนเริ่มต้น(Initial Wafer) ที่ใช้สร้างเป็นดังนี้

- แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ระนาบ(100)
- ค่าพิกัดความต้านทาน 3-6 Ω-cm
- ขนาดความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแผ่นซิลิคอนที่เราใช้ในการสร้าง เป็นชนิดเอ็น โดยจะต้องทำการหักแผ่น (Break) ซิลิคอนให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งระนาบของซิลิคอนจะมี 2 แบบ คือ

1. ระนาบ (100) ระนาบนี้การเรียงตัวของอะตอมที่ผิวหน้านั้นจะไม่มีอะตอมแขนขาดอยู่ที่ผิว หรือจะพูดว่าเป็นอะตอมที่มีแขนครบทั้ง 8 แขน ซึ่งการที่ผิวหน้ามีอะตอมที่มีแขนครบแล้วนั้นทำให้สิ่งแปลกปลอมที่จะมาเกาะนั้นทำได้ยากเพราะแขนของอะตอมครบแล้ว ผิวหน้าจึงค่อนข้างจะสะอาด ระนาบ 100 นี้จึงเหมาะสมสำหรับการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอส เพราะสารกึ่งตัวนำประเภทมอสนั้นมีกระแสไหลที่ผิวหน้า และการหักแผ่นนั้นจะใช้ ปากกาหัวเพชร (Diamond Pen) ขีดที่ปลาย แล้วใช้ที่คีบจับทั้ง 2 ข้างของรอยซิลิคอนที่ต้องการจะหัก แล้วบิดเบาๆ แผ่นซิลิคอนจะหักตามรอยที่เราขีดไว้ เป็นเส้นตรงตามการเรียงตัวของอะตอม

2. ระนาบ (111) ระนาบนี้การเรียงตัว ของอะตอมที่ผิวหน้านั้นจะมีอะตอมแขนขาดอยู่ 1 แขน ซึ่งการที่ผิวหน้ามีอะตอมแขนขาดอยู่นั้นทำให้สิ่งแปลกปลอมที่จะมาเกาะนั้นทำได้ง่าย ผิวหน้าจึงจะไม่ค่อยสะอาด และที่ระนาบ (111) นี้จึงไม่มีความเหมาะสมในการนำมาสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอส เพราะมอสมีกระแสไหลผ่านที่ผิวหน้าอาจทำให้มีกระแสรั่วไหลได้ จึงนิยมนำไปสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภททรานซิสเตอร์ และในการหักแผ่นซิลิคอนทำได้ยาก ซึ่งจะใช้ปากกาหัวเพชร (Diamond Pen) ขีดเป็นแนวยาว แล้วนำแผ่นซิลิคอนนั้นไปไว้บนที่รองโดยให้รอยที่ขีดไว้อยู่ตรงขอบพอดี แล้วใช้ไม้บรรทัด กดตรงรอยที่ขีดไว้บนแผ่นซิลิคอน เพื่อให้แผ่นซิลิคอนนั้นแตกตามรอยที่เราขีดไว้ จากนั้นเราจะทำการบิดซึ่งจะใช้แรงมากกว่าระนาบ (100) แล้วจะได้แผ่นซิลิคอนตามขนาดที่ต้องการ

รูปที่ 4.3 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการหักแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้แผ่นซิลิคอนที่มีขนาดตามต้องการแล้ว ก็จะต้องนำแผ่นซิลิคอนไปผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดก่อน ซึ่งขั้นตอนจะมีดังนี้

4.2 กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process)

หลังจากที่เราได้ทำการเตรียมแผ่นซิลิคอนตามที่ต้องการแล้วขั้นตอนต่อไปคือ กระบวนทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอน เช่น ฝุ่น ไขมัน เป็นต้นโดยกระบวนการทำความสะอาดถือว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญมาก ถ้าเราทำความสะอาดแล้วยังมีสิ่งสกปรกติดอยู่บนแผ่น จะทำให้อุปกรณ์ (Device) ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมาก กระบวนการทำความสะอาดมีขั้นตอนดังนี้คือ

1.การกำจัดฝุ่น

- Ultrasonic ในน้ำ DI 5 นาที
- จุ่มน้ำ DI ในแก้ว 1 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

2. .การกำจัดเศษโลหะ

- ต้มในกรด Nitric (HNO_3) 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- ต้มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

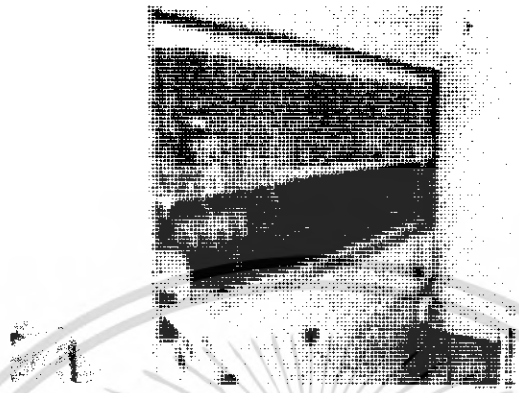
3.การกำจัดไขมัน

- ต้มใน Trichlorethylene 5 นาที โดยในระหว่างเอาขึ้นต้องทำอย่างรวดเร็วมิเช่นนั้น Trichlorethylene จะแห้งเกาะติดแผ่นทำให้อาจจะต้องมีการทำกระบวนการทำความสะอาดใหม่
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

โดยหลังจากได้ทำตามกระบวนการทำความสะอาดแล้ว เราสามารถบอกได้ว่าแผ่นนั้นสะอาดหรือไม่ ดูได้จากการนำแผ่นซิลิคอนไปจุ่มในน้ำ DI แล้ว หยิบขึ้นมาดูว่ามีหรือไม่มีหยดน้ำติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ที่แผ่นซิลิคอน ถ้าไม่มีหยดน้ำติดหรือหยดน้ำที่ติดอยู่มีน้อย แสดงว่าแผ่นซิลิคอนนั้นไม่มีสิ่งสกปรกติดอยู่ ถ้ามีหยดน้ำติดอยู่เป็นจำนวนมากแสดงว่าแผ่นซิลิคอนนั้นมีสิ่งสกปรกติดอยู่



รูปที่ 4.4 Chamber ไว้ใช้สำหรับเตรียมสาร

หลังจากได้แผ่นซิลิคอนที่ผ่านขั้นตอนทำความสะอาดแล้ว ก็จะนำมาสร้างชั้นอ๊อกไซด์โดยใช้กระบวนการ Thermal Oxidation ซึ่งมีขั้นตอนคือ

4.3 กระบวนการสร้างชั้นอ๊อกไซด์ (SiO_2)

กระบวนการสร้างชั้นอ๊อกไซด์ เป็นการชั้นอ๊อกไซด์ไปเคลือบบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยที่ซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของ O_2 หรือ H_2O โดยกระบวนการสร้างชั้นอ๊อกไซด์นั้นมีหลายวิธี เช่น Thermal Oxidation ที่ทำที่อุณหภูมิสูง ๆ , High Pressure Oxidation สร้างที่ความดันต่ำ ๆ , Chemical Vapor Depostion (CVD) เป็นการใช้กระบวนการทางเคมี , Sputtering เป็นวิธีที่สร้างโดยการผ่านสนามไฟฟ้า จากวิธีที่กล่าวมานั้นต่างมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป แต่ในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะวิธี Thermal Oxidation เท่านั้น โดยวิธี Thermal Oxidation จะทำได้ 2 ลักษณะ คือ

4.3.1 กระบวนการ Wet Oxidation

ขั้นตอนนี้จะเป็นปฏิกริยาระหว่างอะตอมของ Si กับอะตอมของอ๊อกซิเจนในน้ำ โดยจะมีปฏิกริยาเคมีดังสมการ

$$Si_{(Solid)} + 2H_2O_{(Dry)} \rightarrow SiO_{2\,(Solid)} + 2H_{2\,(Gas)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

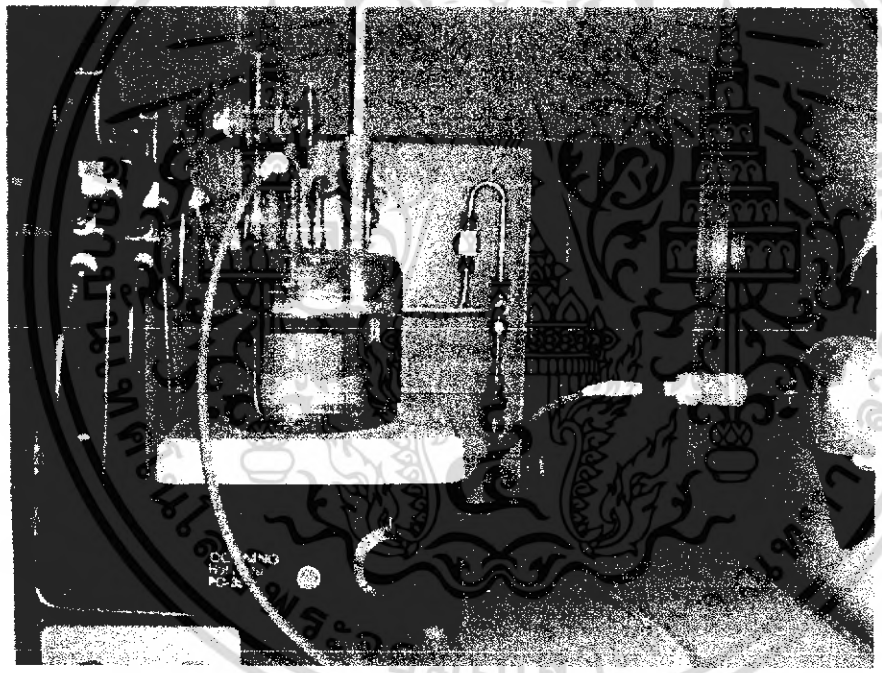
โดยขั้นตอนดังกล่าวนี้จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้

ข้อดี

- ทำให้เกิดชั้นของซิลิคอนไดอ๊อกไซด์ได้รวดเร็วกว่าแบบ Dry เพราะว่าโมเลกุลของน้ำนั้นเล็กกว่าของอ๊อกซิเจน ทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า จึงสามารถสร้างชั้นซิลิคอนไดอ๊อกไซด์หนาได้ดี

ข้อเสีย

- เป็นฉนวนที่ไม่ดี จึงทำให้ทนแรงดันได้ต่ำทำให้ใช้เป็น Gate Oxide ไม่ได้ เพราะว่าขั้นตอนนี้จะทำให้ผลึกที่ได้นั้นมีความหนาแน่นต่ำ เพราะมีรูพรุนเกิดขึ้น



รูปที่ 4.5 การแพร่แบบ Wet Oxidation ที่ต้องใช้ไอน้ำในการแพร่

4.3.2 กระบวนการ Dry Oxidation

ขั้นตอนนี้จะเป็นปฏิกริยาระหว่างอะตอมของ Si กับอะตอมของก๊าซอ๊อกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดมาเจือปน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับอ๊อกซิเจนจนเป็นชั้นของซิลิคอนไดอ๊อกไซด์ได้ดังสมการ

$$Si_{(Solid)} + O_{2(Dry)} \rightarrow SiO_{2(Solid)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขั้นตอนดังกล่าวนี้จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้

ข้อดี

- การสร้างชั้นซิลิคอนด้วยชั้นอ๊อกไซด์ด้วยวิธีนี้นั้นจะให้ชั้นอ๊อกไซด์ที่มีความเป็นฉนวนสูง มีคุณภาพดี เพราะมีความหนาแน่นสูง ทำให้สามารถสร้างเป็น Gate Oxide ได้

ข้อเสีย

- เนื่องจากขั้นตอนนี้ใช้ก๊าซอ๊อกซิเจนทำให้เกิดการรวมตัวกับซิลิคอนได้ยากกว่าแบบ Wet ดังนั้นชั้นซิลิคอนอ๊อกไซด์นั้นจะต้องใช้เวลานานในการสร้าง จึงสร้างชั้นอ๊อกไซด์หนาได้ยาก

จะเห็นได้ว่าในกระบวนการสร้างชั้น Oxide ด้วยกระบวนการนั้น Thermal Oxidation จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป แต่ในการสร้างพี-เอ็นไดโอดนั้นจะใช้ทั้งกระบวนการ Wet Oxidation และ Dry Oxidation โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการสร้างชั้น Oxide มีดังนี้

1. กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกรด HF
2. ล้างด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N_2
3. ปรับอุณหภูมิในเตาให้คงที่ตามต้องการ
4. นำแผ่นผลึกซิลิคอนวางลงบนถาด (Boat) แล้วนำไปวางไว้ที่ปากควอทซ์ 5 นาที
5. ค่อย ๆ ดัน Boat ให้เข้าไปในกลางท่อควอทซ์อย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จนทำให้โครงสร้างผลึกเสียหาย
6. ทำการอ๊อกซิเดชั่นด้วยวิธีที่ต้องการ Dry Oxidation หรือ Wet Oxidation
7. ทิ้งแผ่นผลึกไว้เพื่อให้ได้ชั้นอ๊อกไซด์หนาตามที่ต้องการ
8. ค่อย ๆ ดึง Boat ออกเหมือนขั้นตอนการนำเข้า

กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดอ๊อกไซด์นั้นมีประโยชน์คือสามารถป้องกันสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่น ๆ มาเกาะบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยการป้องการสารเจือนี้ทำให้สามารถทำการแพร่สารหรือฝังไอออนเข้าไปในแผ่นซิลิคอนได้ โดยส่วนที่ไม่ต้องการให้มีการแพร่ก็จะมีชั้นซิลิคอนไดอ๊อกไซด์เคลือบไว้ ส่วนที่ต้องทำการแพร่ก็จะเปิดชั้นซิลิคอนไดอ๊อกไซด์ไว้ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี

ในส่วนกระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นนั้นจะสร้างชั้นซิลิคอนไดอ๊อกไซด์ขนาด 5000 Å ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

1. Dry Oxidation ด้วย O_2 1200cc/min 1 ชม. 1200 cc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Wet Oxidation ด้วย O_2 1000cc/min 1.30 ชม. 1000 cc

3. Dry Oxidation ด้วย O_2 1200cc/min 1 ชม. 1000 cc

เหตุผลที่ต้องสร้างตามขั้นตอน 3 ขั้นตอนข้างต้นคือ

1. Dry Oxidation ที่สร้างแบบ Dry Oxidation ก่อนเพราะอ๊อกไซด์แบบนี้นั้นต้องการให้ผิวหน้านั้นสมบูรณ์ ไม่เกิดการรั่วไหลของกระแส ถ้าสร้างแบบ Wet Oxidation นั้นจะอะตอมของธาตุอื่นปะปนอยู่ด้วยทำให้ผิวหน้าไม่สะอาดมากพอ

2. Wet Oxidation ที่สร้างแบบ Wet Oxidation เพราะในการสร้างชั้นอ๊อกไซด์การสร้างแบบ Dry Oxidation นั้นจะใช้เวลามากกว่าแบบ Wet Oxidation มากๆ ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงใช้การสร้างแบบ Wet Oxidation แทน

3. Dry Oxidation ที่สร้างแบบ Dry Oxidation เพราะที่ผิวบนสุดนั้นชั้นอ๊อกไซด์ควรจะป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือได้ดี โดยการแพร่แบบ Dry Oxidation นั้นจะป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือได้ดีกว่าแบบ Wet Oxidation

4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithographic Process)

เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิคอนไดอ๊อกไซด์ตามมาส์คที่ได้ออกแบบไป เพื่อที่จะสามารถแพร่สารเจือเข้าไปได้ ซึ่งมาส์คที่ได้ออกแบบไว้ที่ใช้ในการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นจะมีทั้งหมด 4 มาส์ค ดังนั้นจะต้องทำกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟีทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อเปิดมาส์คและใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งจะมีขั้นตอนดังนี้

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มีหลายขั้นตอน ดังนี้

4.4.1 การเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist Coating)

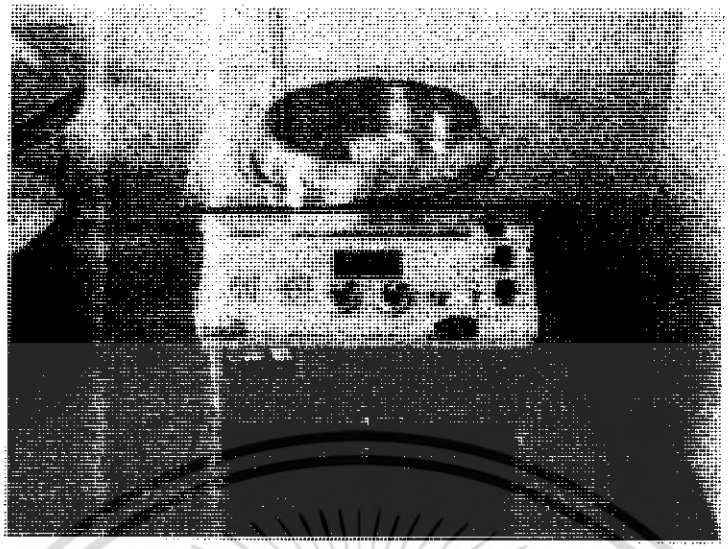
ก่อนที่จะเริ่มการเคลือบสารไวแสงเราจะนำแผ่นซิลิคอนเข้าไปในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 15-20 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดออกได้ง่าย โดยน้ำยาไวแสงที่ใช้เคลือบนั้นมีอยู่ 2 ชนิดคือ

1. น้ำยาไวแสงแบบลบ (Negative Photoresist)

2. น้ำยาไวแสงแบบบวก (Positive Photoresist)

ซึ่งในขั้นตอนนี้เราได้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ 1350) หลังจากที่เราทำการอบเสร็จก็จะนำมาทำการเคลือบน้ำยาไวแสง ซึ่งในการเคลือบน้ำยาไวแสงนั้นทำได้หลายวิธี แต่ในการสร้างพีเอ็นไดโอดนี้จะใช้วิธีสปินเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เครื่องสปินเนอร์

โดยเริ่มแรกให้เรานำแผ่นซิลิคอนที่ทำการอบเสร็จแล้วไปวางลงในจานหมุนในเครื่องสปินเนอร์ จากนั้นเราจะทำการเปิดสวิตช์ของปั๊มลม เพื่อทำการดูดแผ่นซิลิคอนให้อยู่กับที่ และไม่เกิดการหลุดออกของแผ่นขณะทำการหมุน แล้วใช้น้ำยาไวแสงหยดลงไปตรงกลางของแผ่นซิลิคอน 3 – 4 หยด แล้วเปิดเครื่องสปินเนอร์โดยใช้ความเร็วรอบประมาณในครั้งแรก 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 วินาที ซึ่งในรอบแรกจะทำเพื่อเกลี่ยน้ำยาไวแสงให้กระจายไปทั่ว แล้วต่อด้วย 3000 รอบ/นาที อีก 30 วินาที เพื่อที่จะทำให้น้ำยาไวที่เคลือบผิวนั้นเรียบสม่ำเสมอกัน หลังจากเสร็จหากแผ่นซิลิคอนที่ได้นั้นมีการกระจายของน้ำยาไวแสงที่ไม่สม่ำเสมอโดยอาจ จะมีการเกิดการนูนขึ้นตอนปลายของแผ่นหรือผิวหยาบไม่เรียบนั้นมีผลมาจากการหยดน้ำยาไวแสงมากเกินไปหรือใช้ความเร็วรอบในการหมุนที่ไม่เหมาะสม

4.4.2 การอบ Prebake

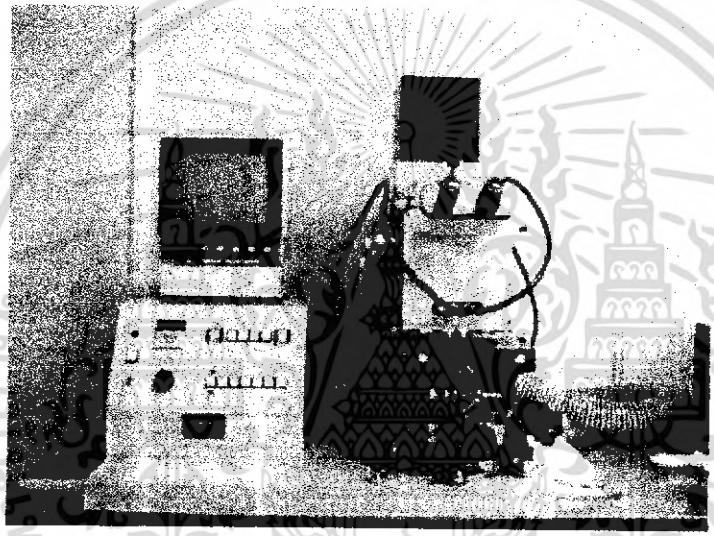
หลังจากที่นำแผ่นซิลิคอนไปเคลือบน้ำยาไวแสงแล้วจะนำแผ่นซิลิคอนเข้าไปทำการอบที่เตาอบ (Prebake) ที่อุณหภูมิ 90 – 100 ^{0}C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เคลือบมาบนแผ่นนั้นแห้งสนิทและยึดติดกับแผ่นซิลิคอนได้มากขึ้น

4.4.3 การถ่ายแบบ (Mask Alignment and Expose)

หลังจากที่เราทำการเคลือบสารไวแสงชนิดบวกลงบนแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีสปินเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Spinner) แล้วเราจะนำแผ่นซิลิคอนเข้าไปในเตาอบเพื่อทำการอบ (prebake) ที่อุณหภูมิ 90-100°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเราจึงนำกระจกต้นแบบที่ได้เตรียมลวดลายไว้ไปวางบนเครื่องถ่ายแบบ ซึ่งเครื่องถ่ายแบบนั้นจะมีปั๊มลมเหมือนกับเครื่องสปินเนอร์ไว้ใช้สำหรับดูดแผ่นซิลิคอน ไม่ขยับเขยื้อนเวลาทำการปรับ และในขั้นตอนการเตรียมการถ่ายแบบนั้นเราจะต้องจัดกระจกต้นแบบและแผ่นซิลิคอนให้อยู่ตรงกัน ซึ่งกระจกต้นแบบจะอยู่ข้างบน ส่วนแผ่นซิลิคอนจะอยู่ข้างล่าง จากนั้นทำการปรับเฉพาะแผ่นซิลิคอน หลังจากเสร็จแล้วเราจะทำการฉายด้วยแสงอัลตร้าไวโอเลต เป็นเวลา 10 วินาที โดยขั้นตอนในการสร้างพีเอ็นไดโอดนั้นเราจะใช้การถ่ายแบบ 4 ครั้ง



รูปที่ 4.7 เครื่องถ่ายแบบ

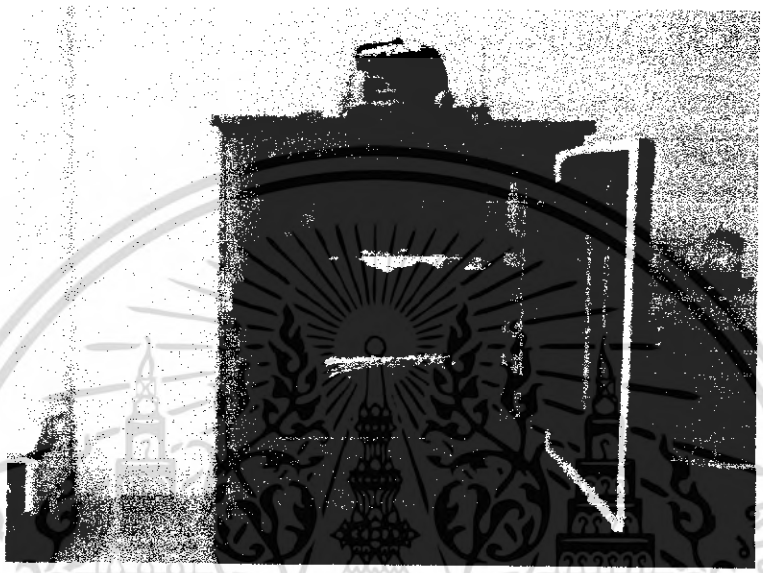
4.4.4 การ Development

หลังจากผ่านขั้นตอนการถ่ายแบบแล้ว กระบวนการ Development คือการสร้างลวดลายขึ้นมา โดยขึ้นกับว่าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดใด ถ้าเป็นชนิดบวกส่วนที่ถูกแสงจะละลายออกไป ถ้าเป็นชนิดลบส่วนที่ไม่โดนแสงจะละลายออกไป โดยขั้นตอนคือเตรียมน้ำยา AZ Developer 2 แก้ว น้ำ DI 2 แก้ว แล้วนำชิ้นงานมาจุ่มลงในน้ำยา Developer แก้วแรก 15 วินาที แล้ว จุ่มในน้ำยา AZ Developer แก้วที่สองอีก 15 วินาที จากนั้นนำไปจุ่มในน้ำ DI ทั้ง 2 แก้ว แล้วนำมาเป่าด้วยก๊าซ N_2 หลังจากเสร็จขั้นตอนเราจะนำเข้าไปในเตาอบ(postbake) อีกครั้งที่อุณหภูมิ 90-100°C เป็นเวลา 10-20 นาที เพื่อไล่ความชื้น ป้องกันฟิล์มลอกออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 การอบ Postbake

หลังจากผ่านกระบวนการ Develop แล้วจะนำแผ่นซิลิคอนเข้าไปในเตาอบอีกครั้งเพื่อทำการอบ (Postbake) แผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ $90-100\,^{0}C$ เป็นเวลา $10-20$ นาที เพื่อทำให้ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนนั้นแห้งสนิท ก่อนที่จะนำไปทำกระบวนการต่อไป



รูปที่ 4.8 เตาอบที่ใช้ในการอบ Prebreak และ Postbake

4.5 การ Etching

ในการ Etching คือการลอกชั้นอ๊อกไซด์หรือวัสดุอย่างอื่นที่ไม่ต้องการออก เช่น ส่วนของอลูมิเนียม โดยสารที่สกัดนั้นจะเรียกว่า Etchant โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

การกำจัดชั้นอ๊อกไซด์ในส่วนที่โดนแสงออก โดยใช้สารที่มีอัตราส่วน H_3PO_4:HNO_3:CH_3COOH:H_2O= 80:5:5:10 แล้วนำไปต้ม จากนั้นนำชิ้นงานไปจุ่ม เป็นเวลาประมาณ 19 วินาที ซึ่งส่วนที่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่จะไม่ถูกกัดออก

Oxide Etching

- จุ่มในสารละลาย Buffer 5 นาที อัตราการ Etching 1000Å/นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดอลูมีเนียมออกจะใช้สารที่เรียกว่า Al-Etching โดยจะนำไปต้มให้อุ่นพอประมาณ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ต้องการกัดอลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออกใส่ลงไป ซึ่งสักพักจะเห็นว่าน้ำนั้นจะขุ่นขึ้น และจะเห็นลายที่แผ่นปรากฏชัดเจน

Al- Etching

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

4.6 การลอกน้ำยาไวแสง

ในขั้นตอนนี้จะลอกน้ำยาไวแสงออก โดยใช้ Acetone ซึ่งให้เรานำชิ้นงานจุ่มลงใน Acetone เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นนำไปจุ่มในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N_2

4.7 กระบวนการเติมสารเจือ

ในกระบวนการเติมสารเจือนั้นจะต้องทำการเติมสารเพื่อให้ได้รอยต่อแบบพี-เอ็นเกิดขึ้น โดยในการเติมสารนั้นการจะเลือกใช้สารอะไรในการแพร่นั้นขึ้นอยู่กับว่าแผ่นซิลิคอนที่มีอยู่นั้นเป็นแผ่นซิลิคอนชนิดใด ถ้าเป็นแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นก็จะทำการแพร่สารเจือชนิดพี โดยธาตุที่นำมาใช้ดังเช่น แกลเลี่ยม อลูมิเนียม โบรอน อินเดียม เป็นต้น ส่วนถ้าเป็นแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดพีก็จะทำการแพร่สารเจือชนิดเอ็น ธาตุที่นำมาใช้คือเช่น ฟอสฟอรัส พลวง สารหนู ซึ่งในการเติมสารนั้นเพื่อทำให้ได้รอยต่อแบบพี-เอ็นนั้น ไม่ว่าจะเป็นการเติมสารเจือชนิดใด สารเจือที่เติมเข้าไปในนั้นจะต้องมีความหนาแน่นเท่ากับความหนาแน่นของสารเจือที่มีอยู่ก่อนแล้ว จึงจะทำให้เกิดการหักล้างกันหมดพอดีและทำให้เป็นรอยต่อแบบพี-เอ็น การเติมสารเจือมีอยู่ 2 วิธีคือ

4.7.1 การแพร่ (Diffusion Process)

การแพร่สารในกระบวนการสร้างสารประดิษฐ์กึ่งตัวนำนั้น เป็นการแพร่สารในของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์แบบนี้จะต้องเกิดที่อุณหภูมิสูง ๆ (ราว ๆ 1000 องศาเซลเซียสหรือมากกว่านั้น) หรือจะกล่าวได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูง ๆ อะตอมสารใด ๆ ก็สามารถแพร่เข้าไปยังของแข็งได้ โดยจะมีข้อดีและข้อเสียดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี

- ได้ความลึกรอยต่อค่อนข้างมาก

- เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก และอุปกรณ์มีราคาไม่แพง

ข้อเสีย

- มีการแพร่กระจายแบบด้านข้าง (Lateral Diffusion)

- ไม่สามารถควบคุมความหนาแน่นของอะตอมสารเจือได้แน่นอน

4.7.2 การฝังไอออน (IonImplantion)

เป็นการยิงอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกของสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยหลักการทางสนามไฟฟ้า เริ่มจากการทำให้อะตอมสารเจือมีสภาพเป็นไอออนบวก จากนั้นใช้สนามไฟฟ้าที่สุญญากาศที่มีค่ามาก ๆ เป็นตัวเร่งไอออนให้มีความเร็วสูง ทำให้พลังงานจลน์มีค่ามาก และเมื่อเข้ากระทบกับแผ่นผลึกก็จะสามารถฝังเข้าไปในเนื้อผลึกได้ ซึ่งในวิธีนี้ก็จะมีข้อดีและข้อเสียต่างกับวิธีการแพร่ดังนี้คือ

ข้อดี

- ไม่มีการแพร่กระจายด้านข้างเนื่องจากอะตอมที่ยิงเข้าไปนั้นจะกระจุกกันอยู่

- กำหนดความหนาแน่นของอะตอมสารเจือได้แน่นอน

- เหมาะกับเทคโนโลยีที่ต้องการความละเอียดสูงเช่น VLSI , ULSI

ข้อเสีย

- ยุ่งยาก และอุปกรณ์มีราคาแพง

- ความลึกของรอยต่อมีค่าน้อย

- กายหลังการยิงอะตอมแล้วจะต้องมีการ Anneal เพื่อให้มีการกระจายตัวใหม่ของอะตอมสารเจืออย่างสม่ำเสมอ

- มีรังสี X เกิดขึ้น เพราะพลังงานลดลงอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการสร้างพีเอ็นไดโอดจึงเลือกใช้การแพร่สารเจือ โดยในการแพร่สารเจือนั้นทำการแพร่ 2 ขั้นตอน คือ ประกอบไปด้วย การแพร่แบบ Deposition และแบบ Drive in ซึ่งรายละเอียดจะมีดังนี้

การแพร่แบบ Deposition นี้จะใช้ Solid หรือแผ่นที่เป็นสารเจือที่ต้องการแพร่ แพร่ไปยังบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

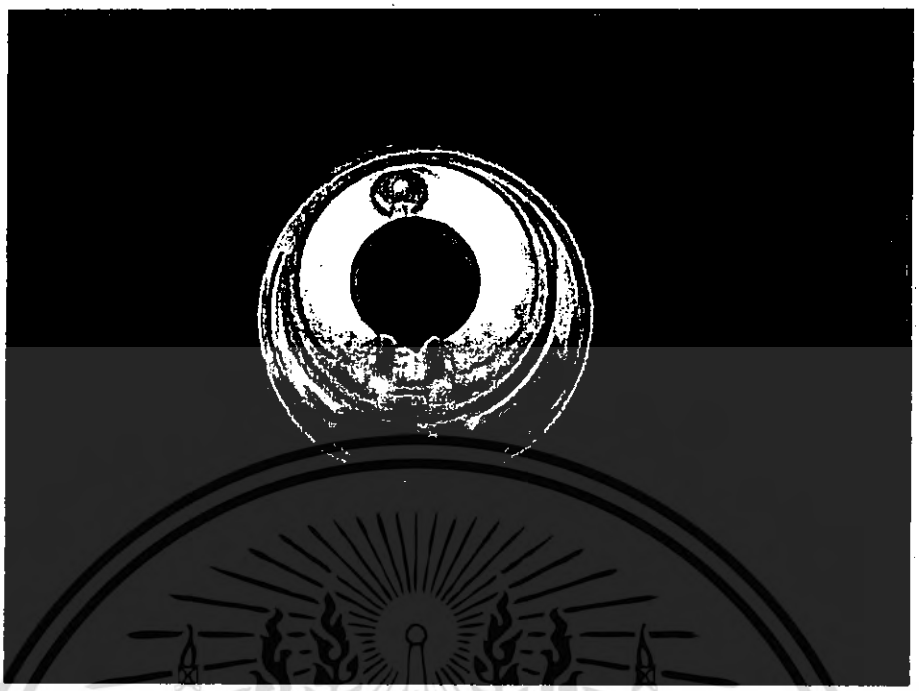
- หลังจากที่เตรียมแผ่นและสารเจือที่แพร่เสร็จเรียบร้อยแล้ว
- จากนั้นก็นำฉาดค่อยๆ เข้าไปในเตาเหมือนกระบวนการสร้างชั้นอ๊อกไซด์
- ถ้าเป็นสารเจือแบบโบรอนจะต้องทำการ Activate ก่อนโดย Flow O_2 1000 cc เป็นเวลา 20 นาที เพื่อที่ให้แผ่นโบรอนนั้นกลายเป็น B_2O_3 เพื่อสารโบรอนจะได้แพร่ได้ แต่ถ้าเป็นสารเจือแบบฟอสฟอรัสสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้เลย

-Flow N_2 800 cc 20 นาที ที่ใช้ก๊าซ N_2 เพราะก๊าซนี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งอื่น ๆ

-Flow O_2 1000 cc 10 นาที เพื่อที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่มีการแพร่สารเจือเข้าไปจะมีสารเจือตกค้างอยู่บนผิวหน้าและการที่จะทำให้ผิวหน้าสะอาดนั้นทำได้ยากจึงมีการใช้ก๊าซ O_2 เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเจือที่อยู่บนผิวหน้า ซึ่งจะช่วยให้การทำความสะอาดได้สะอาดขึ้นมาก

รูปที่ 4.9 แผ่นซิลิคอนขณะเอาเข้าเตาอบเพื่อทำการแพร่อะตอมสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผ่นซิลิคอนขณะนำเข้าเตาอบ

ส่วนการแพร่แบบ Drive in จะทำหลังจากการแพร่แบบ Deposition แล้วซึ่งหลังจากที่ได้แพร่แบบ Deposition แล้ว สารเจือที่เข้ามาอยู่ในแผ่นจะรวมตัวกัน ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้ความร้อนในการกระจายสารเจือที่รวมกลุ่มกันอยู่ออกไป และทำให้สารเจือเคลื่อนที่ลึกลงไปในผิวอีก อีกทั้งจะทำการสร้างชั้นอ๊อกไซด์ไปในตัวด้วย

- Dry Oxidation O_2 1200 cc / min เป็นเวลา 15 นาที
- Wet Oxidation O_2 1000 cc / min เป็นเวลา 30 นาที
- Dry Oxidation O_2 1200 cc / min เป็นเวลา 15 นาที

โดยหลังจากที่ได้ผ่านกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟีและการเอ็ทช์ชิ่งแล้ว จะทำให้แผ่นซิลิคอนนั้นมีช่องสำหรับที่จะทำการเติมสารเจือเข้าไปได้ ซึ่งในการเติมสารนั้นจะทำได้ 2 วิธี ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่ในที่นี่จะใช้กระบวนการแพร่สาร โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

1.ในการแพร่ครั้งแรก จะทำการแพร่สารเจือพี โดยในการทำขั้นตอนจะคล้าย ๆ กับขั้นตอนอ๊อกซิเดชั่น เริ่มจากเอาแผ่นซิลิคอนที่ทำกระบวนการแพร่ไปวางไว้ในถาด (Boat) แล้วนำแผ่นซึ่งเป็นสารเจือมาวางไว้ใกล้ ๆ กับแผ่นซิลิคอน ซึ่งแผ่นสารเจือนี้ก็คือสารเจือ ซึ่งถ้าเป็นการแพร่สารเจือพีจะใช้โบรอน และถ้าเป็นการแพร่สารเจือเอ็นจะใช้ฟอสฟอรัส หลังจากนั้นนำไปวางไว้ที่ปากท่อของท่อควอทซ์ 5 นาที แล้ว ค่อย ๆ ดัน Boat ให้เข้าไปในกลางท่อควอทซ์

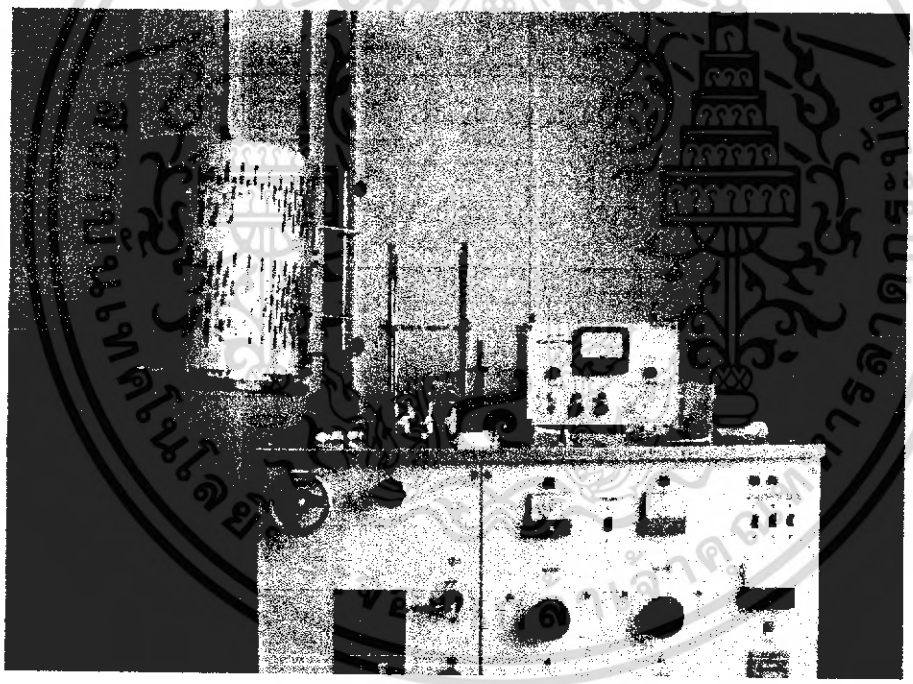
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จนทำให้โครงสร้างผลึกเสียหาย ขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 5 นาทีจากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลานาน จากนั้นค่อยๆ ดึง Boat ออกมาซึ่งขั้นตอนนี้ก็จะทำเหมือนตอนเอาเข้า คือค่อยๆ ดึง Boat จนถึงปากท่อโดยจะใช้เวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นก็ทิ้งไว้ที่ปากของท่อควอนซ์อีก 5 นาที ก็จะเป็นการเสร็จขั้นตอน

2.หลังจากนั้นก็จะนำแผ่นซิลิคอนไปผ่านกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีและการเอ้ทช์ซึ่งอีกครั้งเพื่อเตรียมจะทำการแพร่สารเจืออีกครั้งโดยครั้งนี้ก็จะทำการแพร่สารเจือเอ็น ซึ่งในที่นี้คือสารฟอสฟอรัส และขั้นตอนการทำก็จะเหมือนกับการแพร่สารเจือพี ก็จะหมดขั้นตอนการแพร่สาร

4.8 กระบวนการ Evaporation

กระบวนการนี้จะเป็นการนำโลหะมาเคลือบเพื่อสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มมิค ซึ่งจะมีขั้นตอนดังนี้



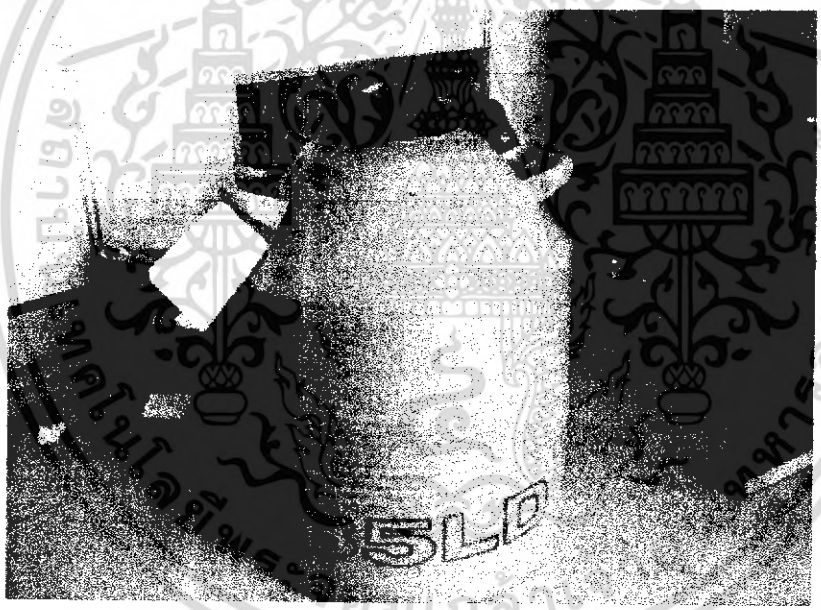
รูปที่ 4.11 เครื่อง Evaporation

- เลือกโลหะที่จะใช้ทำการแพร่ซึ่งก็คือ อลูมิเนียม จากนั้นนำมาตัดเป็นส่วน ๆ โดยจะยาวเส้นละ 1 ซม. จำนวน 7 เส้น แล้วนำลวดอลูมิเนียมที่ตัดออกมานี้มางอเพื่อที่จะนำไปแขวนได้ หลังจากนั้นก็จะนำลวดอลูมิเนียมนี้ไปทำความสะอาด โดยนำไปจุ่มลงในบัฟเฟอร์เพื่อกัดอ๊อกไซด์ที่เคลือบออก โดยทิ้งไว้จนลวดนั้นขาว แล้วนำไปจุ่มในน้ำ DI เป่าให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำไส้หลอดทังสเตนมาทำความสะอาด โดยทำการต้ม Tricholo แล้วใส่ลวดลงในหลอดแก้วที่สะอาดจากนั้นนำไปจุ่มลงใน Tricholo จากนั้นนำไป Utrasonic ใน Acetone เป็นเวลา 3 นาที

- ทำการเตรียมเครื่อง Evaporation นำอุปกรณ์ที่จะใช้ไปวางบนตำแหน่งต่าง ๆ ให้ถูกแล้ว ทำให้ภายในนั้นเป็นสุญญากาศ ซึ่งจะใช้ grease ทาที่ขอบยางของระฆัง แล้วปิดลง แล้วก็ทำการสูบอากาศออกเพื่อให้ภายในเป็นสุญญากาศ ซึ่งจะสามารถตรวจสอบดูได้ว่าเป็นสุญญากาศหรือไม่ ก็ดูได้จาก Geissler ถ้ากดแล้วยังเป็นสีม่วงแสดงว่ายังมีอากาศอยู่ จากนั้นเมื่อเป็นสุญญากาศแล้วก็ลดความดันลงเรื่อย ๆ จนมีค่าประมาณ 10^{-6} Torr จากนั้นจะทำการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทังสเตนเป็นจำนวนมากซึ่งจะเกิดความร้อนขึ้น ทำให้อลูมิเนียมที่แขวนไว้นั้นระเหยกลายเป็นไอแล้วฟุ้งกระจายไปทั่วซึ่งจะทำให้อลูมิเนียมนี้ไปเคลือบบนแผ่นซิลิคอนได้



รูปที่ 4.12 ไนโตรเจนเหลวที่ใช้เติมเพื่อลดความดัน

ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำหลังจากที่แหร่สารเจือเสร็จแล้วนำไปผ่านกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องคอนแท็คแล้วจึงนำมาเข้าสู่กระบวนการ Evaporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

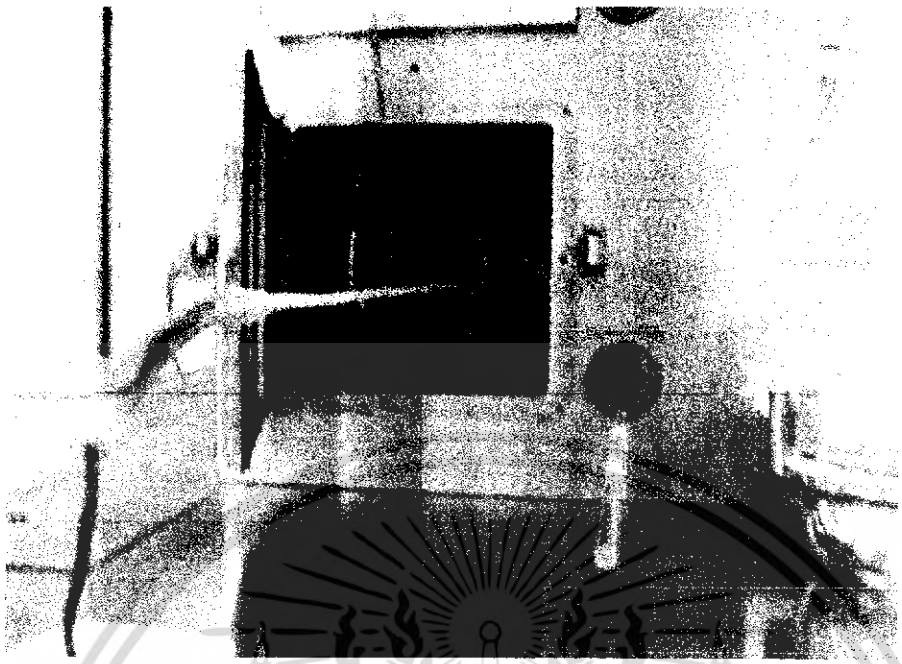
4.9 กระบวนการซินเตอร์ริ่ง (Sintering)

กระบวนการซินเตอร์ริ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 15 นาที โดยมีอัตราการ Flow 1 ลิตร/นาที เพื่อให้ผิวสัมผัสระหว่างซิลิคอนกับอลูมิเนียมเป็นผิวสัมผัสที่ดี ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิ

รูปที่ 4.13 เครื่องที่ใช้ในการ Sintering

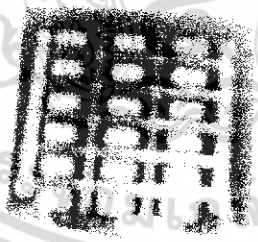
รูปที่ 4.14 ท่อที่นำเข้าไปในเตาเพื่อทำการ Sintering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การวัดอุณหภูมิภายในเตาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล

ซึ่งขั้นตอนนี้จำหลังจากที่ได้ทำกระบวนการ Evaporation เสร็จแล้วแล้วนำไปผ่านกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี และการทำ Al-Etching และหลังจากผ่านกระบวนการนี้เสร็จแล้วก็จะสิ้นสุดขั้นตอนในการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

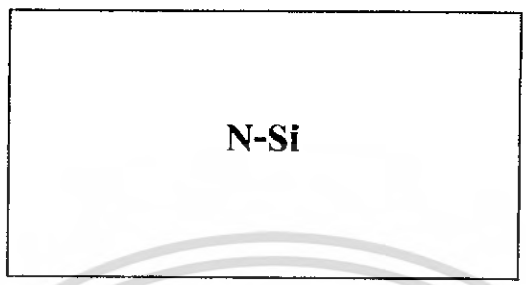


รูปที่ 4.16 แผ่นซิลิคอนหลังจากสร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปตัดขวางแสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

- เตรียมแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้

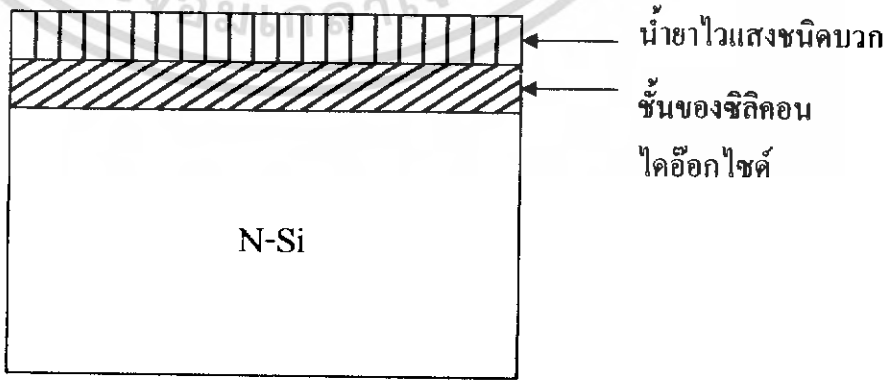


รูปที่ 4.17 แผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้

- หลังผ่านกระบวนการอ๊อกซิเดชั่น

รูปที่ 4.18 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการเคลือบชั้นอ๊อกไซด์

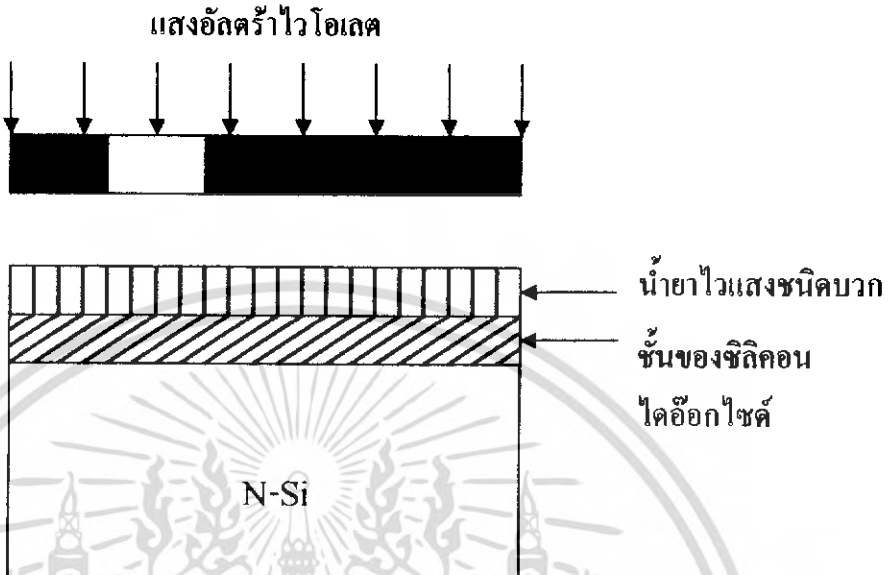
- เข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดมาส์คที่ 1
- หลังผ่านการเคลือบน้ำยาไวแสงในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี



รูปที่ 4.19 แผ่นซิลิคอนหลังจากเคลือบน้ำยาไวแสง

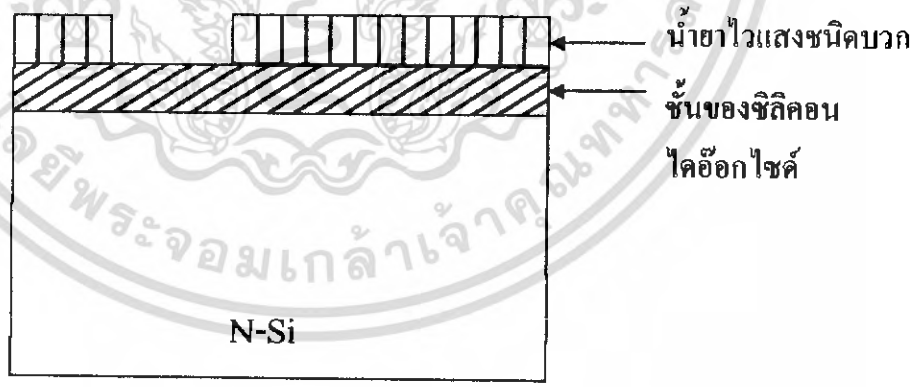
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลังผ่านการฉายด้วยแสงในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี



รูปที่ 4.20 การถ่ายแบบของแผ่นซิลิคอน

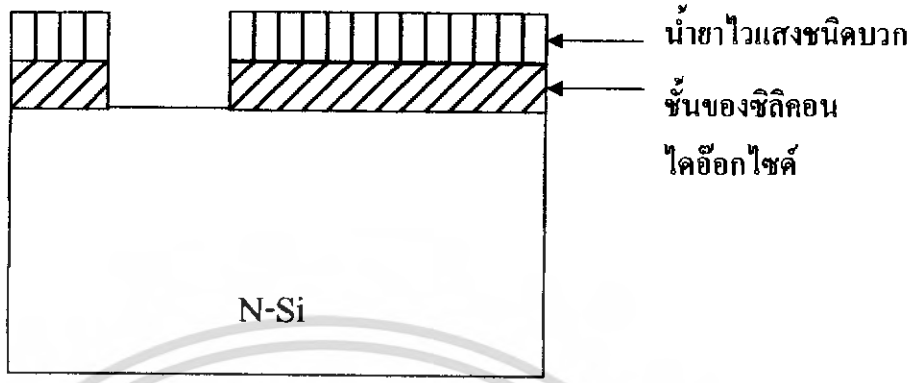
- หลังผ่านการ Develop ในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี



รูปที่ 4.21 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการ Develop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลังผ่านกระบวนการ Etching

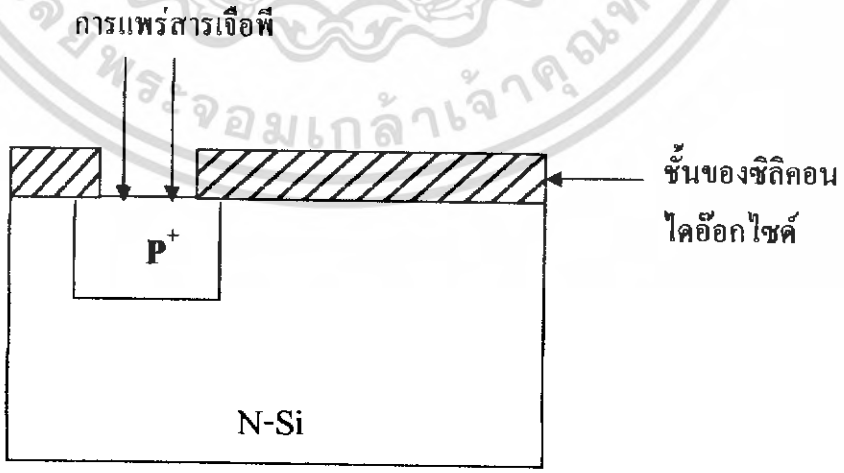


รูปที่ 4.22 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการ Etching

- หลังผ่านการลอกน้ำยาไวแสง

รูปที่ 4.23 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านขั้นตอนการลอกน้ำยาไวแสง

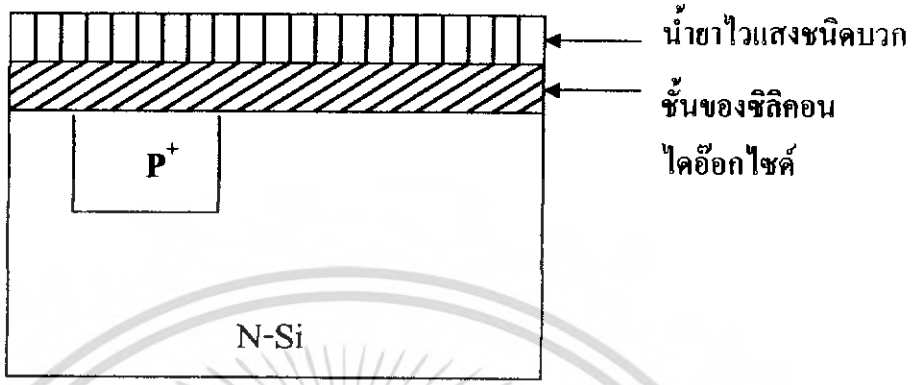
- หลังผ่านการแพร่สารเจือชนิดพี



รูปที่ 4.24 แผ่นซิลิคอนหลังจากแพร่สารเจือพี

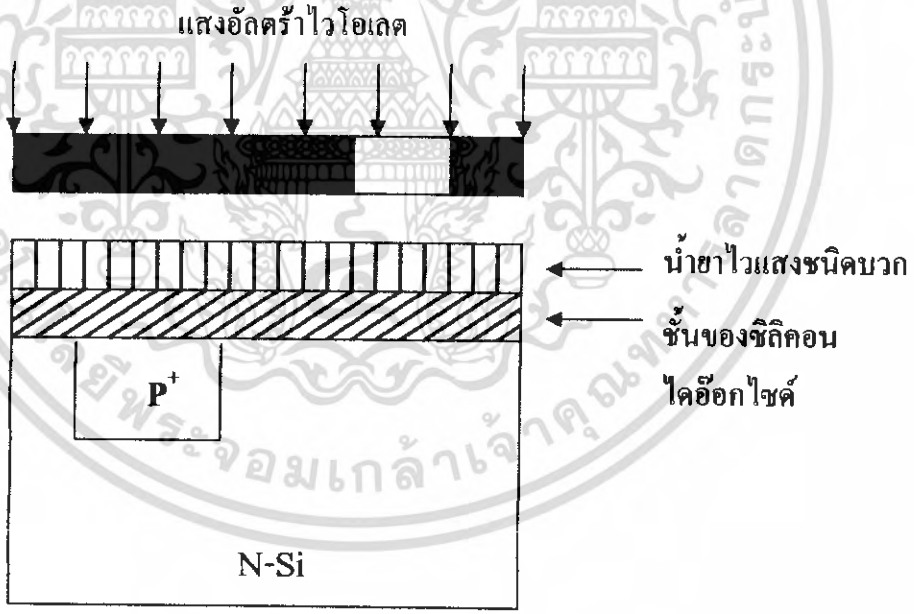
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำแผ่นซิลิคอนเข้าสู่กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีเพื่อเปิดมาส์คที่ 2
- หลังผ่านการเคลือบน้ำยาไวแสง



รูปที่ 4.25 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการเคลือบน้ำยาไวแสง

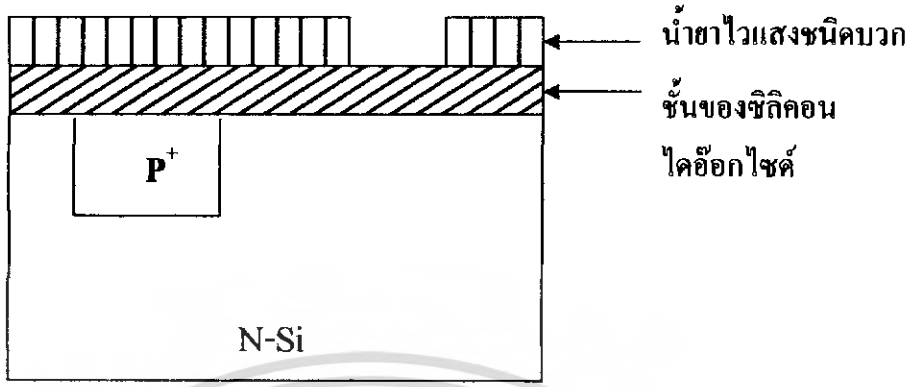
- หลังจากผ่านการฉายด้วยแสง



รูปที่ 4.26 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการฉายด้วยแสง

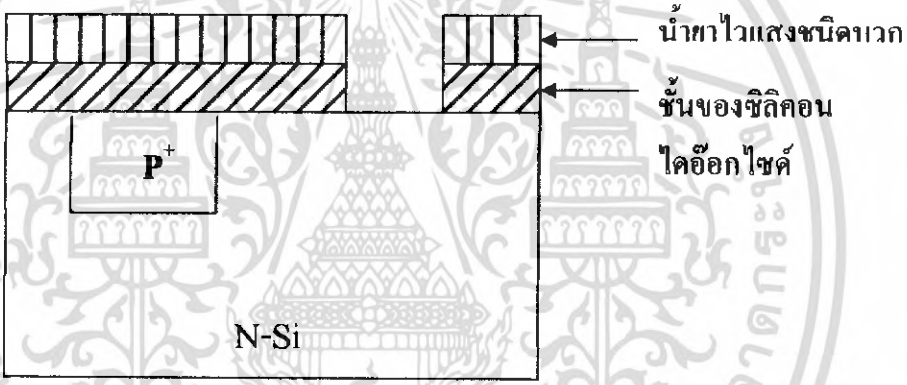
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลังผ่านการ Develop



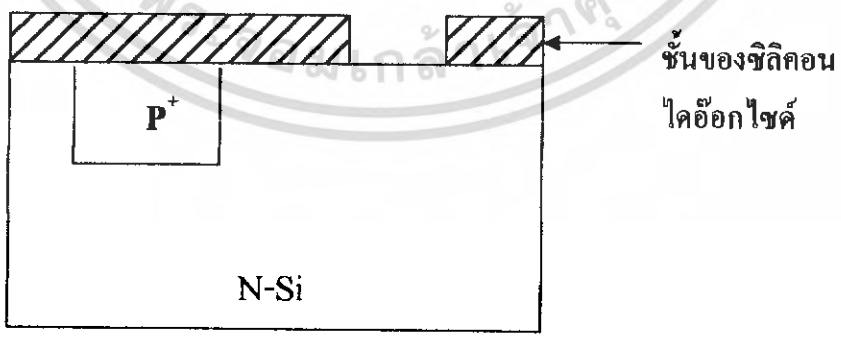
รูปที่ 4.27 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการ Develop

- หลังจากผ่านการ Etching



รูปที่ 4.28 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการ Etching

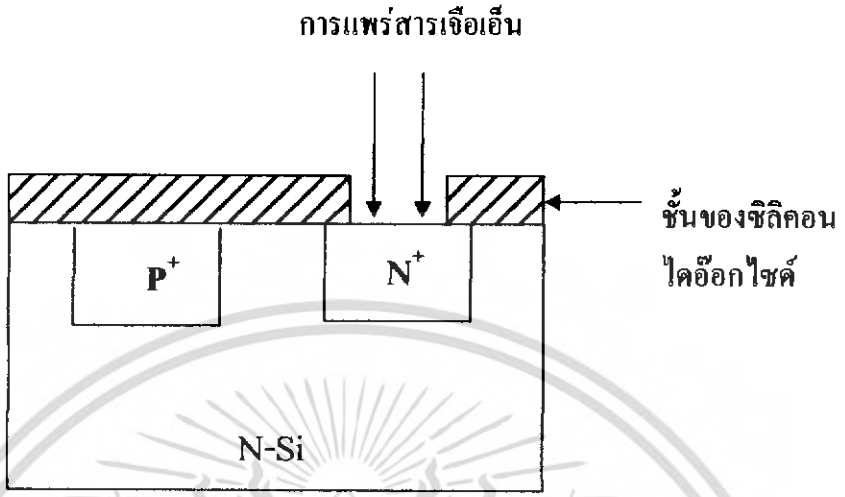
- หลังผ่านการลอกน้ำยาไวแสง



รูปที่ 4.29 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านขั้นตอนการลอกน้ำยาไวแสง

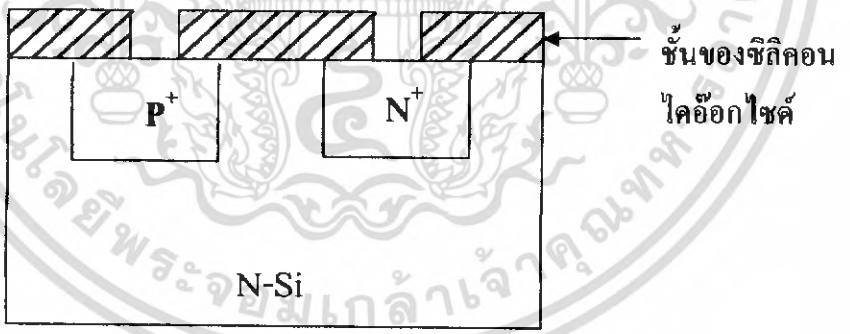
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลังจากแพร่สารเจือชนิดเอ็น



รูปที่ 4.30 แผ่นซิลิคอนหลังจากแพร่สารเจือเอ็น

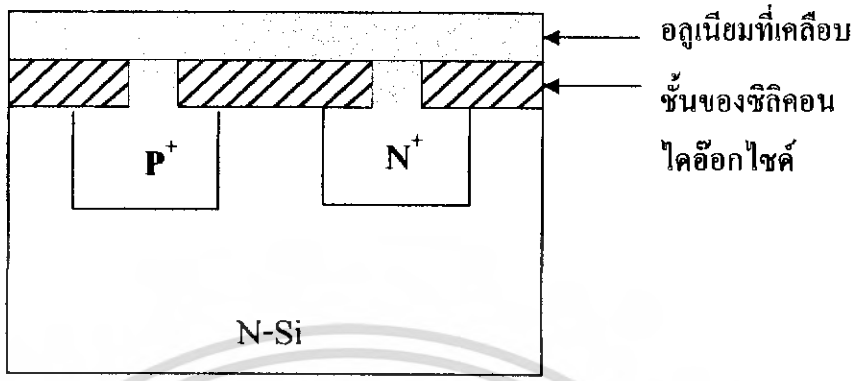
- หลังจากนำแผ่นซิลิคอนผ่านกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี Etching และการลอกน้ำยาไวแสงเพื่อเปิดมาส์คที่ 3



รูปที่ 4.31 แผ่นซิลิคอนหลังจากเปิดมาส์คที่ 3 เสร็จ

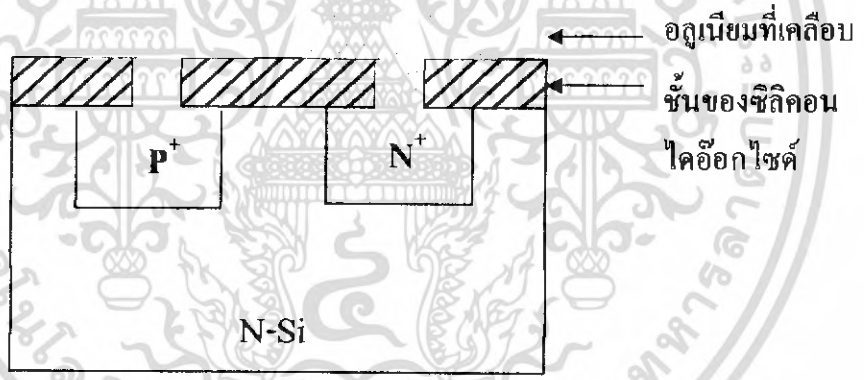
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลังจากนำแผ่นซิลิคอนเข้าไปทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยการ Evaporation



รูปที่ 4.32 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการ Evaporation

- หลังจากนำแผ่นซิลิคอนผ่านกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี Etching และการลอกน้ำยาไวแสง



รูปที่ 4.33 แผ่นซิลิคอนหลังจากโฟโต้ครั้งที่ 4

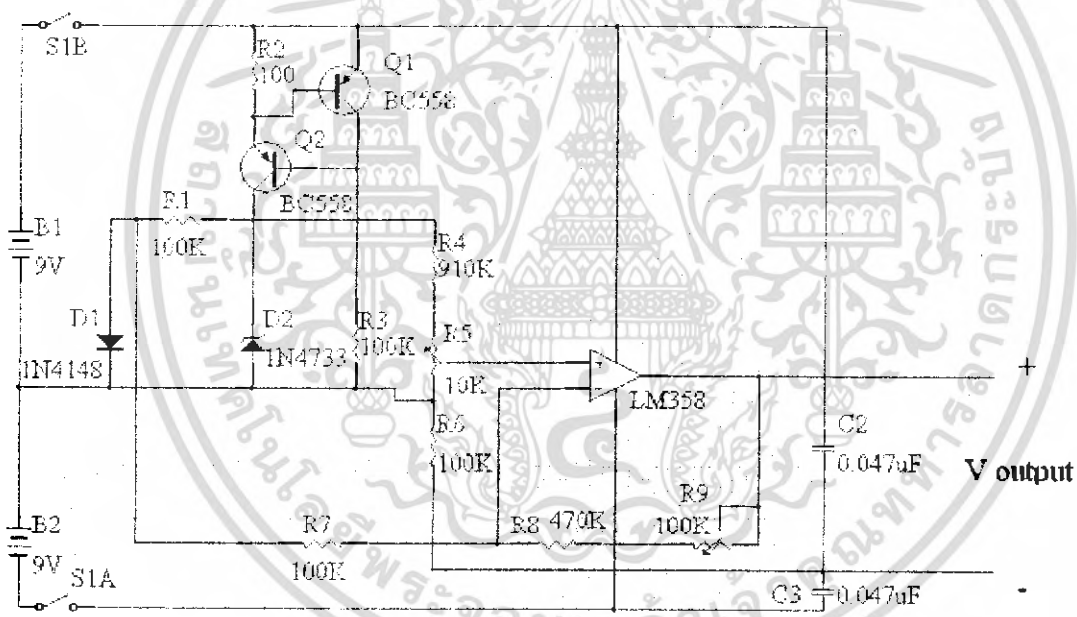
วงจรที่ใช้ร่วมกับ Thermal Diode

สัญญาณที่ออกมาจากตัวเซ็นเซอร์ไดโอดนั้น มีขนาดเล็กมาก และมีค่าไม่เหมาะสมกับการที่จะนำไปให้ผู้อ่านค่า อ่านได้โดยง่าย ดังนั้นจึงต้องมีวงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันที่ออกมาจากตัวเซ็นเซอร์ไดโอด ซึ่งมีขนาดเล็กมาก โดยมีค่าประมาณ 500 mV และยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติของไดโอด คือ เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะมีค่าลดลง โดยลดลงประมาณ 2 mV / 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส ทำให้ผู้ที่นำไปใช้ไม่สามารถอ่านได้ง่าย จึงต้องทำการขยายแรงดัน และปรับอัตราขยายให้เหมาะสมแก่ผู้อ่าน

การลดลงแรงดัน 2 mV ทุกๆ 1 องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้นนั้น มีค่าน้อยมาก ทำให้ไม่แสดงผลออกมาได้โดยง่าย จึงทำการขยายแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ ให้ได้ค่า 10 mV ต่อองศาเซลเซียส ดังนั้นส่วนภาคขยายสัญญาณจะมีค่าอัตราขยายเป็น $\frac{10mV}{2mV} = 5$ เท่า และช่วงอุณหภูมิที่ต้องการคือ ช่วง 0 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส ดังนั้นแรงดันที่เอาท์พุทก็เปลี่ยนไปเท่ากับ (2 mV / องศาเซลเซียส) x (150 องศาเซลเซียส) x 5 ซึ่งมีค่า 1.5 โวลท์ และภาคขยายยังต้องสามารถชดเชยแรงดันตกคร่อมไดโอด ซึ่งมีค่าประมาณ 0.6 โวลท์ ไม่ให้มีแรงดันออกที่เอาท์พุท หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ต้องการขยายเฉพาะแรงดันที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลเซียสขึ้นไปเท่านั้น แรงดันที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสต้องมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 4.34 วงจรที่ใช้ร่วมกับเซ็นเซอร์อุณหภูมิโดยใช้ไดโอด

จากรูปวงจรที่ 4.34 ตัว D1 คือเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ Q1 , Q2 , R2 และ R3 เป็นชุดวงจรจ่ายกระแสคงที่ให้แก่เซ็นเซอร์ไดโอด ซึ่งสามารถคำนวณหากระแสที่จ่ายออกมาได้จาก $I = \frac{V_{BE}}{R_2}$ ดังนั้นกระแสที่จ่ายออกมาคือ 600 mV / 100 Ω = 6 mA ซึ่งจะแบ่งจ่ายให้ D2 ซึ่งเป็นซีเนอร์ไดโอด 5 mA เพื่อทำให้มีแรงดันคงที่ 5.1 โวทล์ และไม่ขึ้นกับแรงดันจากแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแบ่งจ่ายให้ D1 0.5 mA โดยมี R1 เป็นตัวกำหนดกระแส ซึ่งเป็นกระแสที่ต่ำเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดความร้อนสะสมในตัวไดโอด และทำให้มีแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่ามากและเหมาะสมต่อการนำไปขยายต่อไป แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะถูกขยายโดยภาคขยายโดยการต่อวงจรออปแอมดังรูป ซึ่งจะมีอัตราขยายเท่ากับ $1+\frac{R_8+R_9}{R_7}$ โดยสามารถปรับอัตราขยายได้จาก R9 เพื่อให้อัตราขยายมีค่าที่เหมาะสม และ R4 ,R5 และ R6 มีหน้าที่ปรับแรงดันให้กับออปแอมเพื่อหักล้างกับแรงดัน 0.5 โวทล์ที่ตกคร่อมไดโอด D1 โดยมีรายชื่ออุปกรณ์ภายในวงจรดังนี้

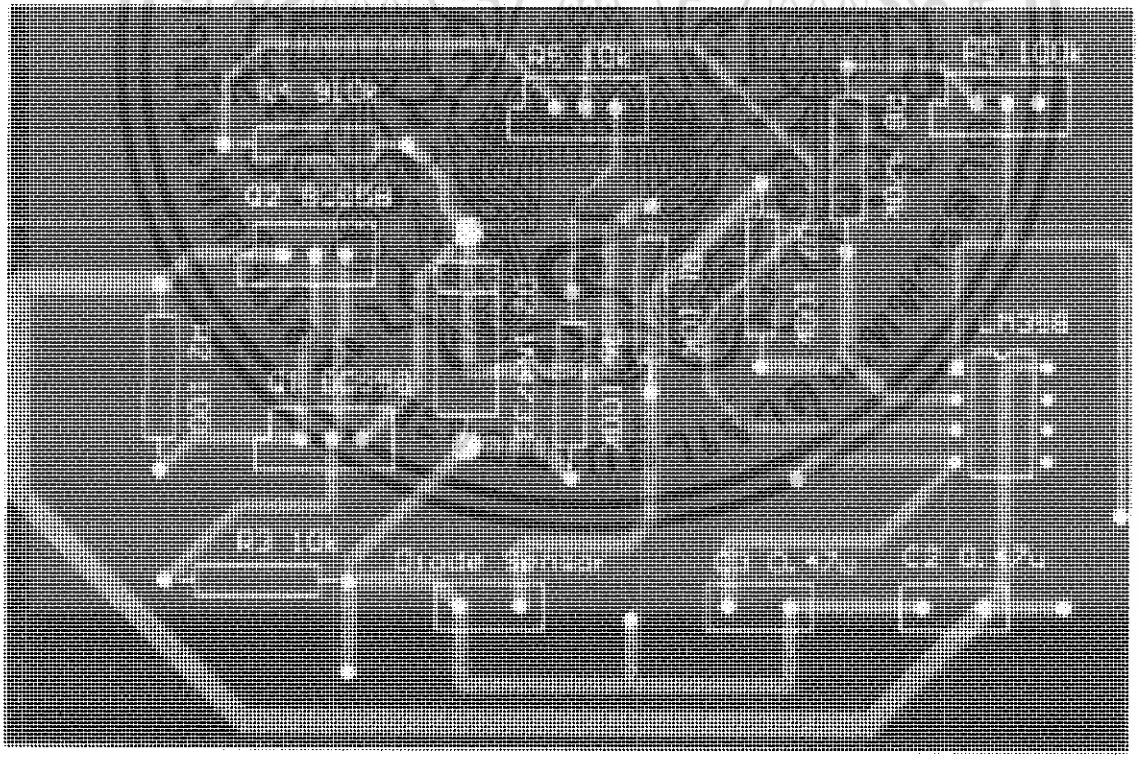
1. B1 , B2 แบตเตอรี่ขนาด 9 โวทล์
2. C2 , C3 ค่า 0.047 uF แบบเซรามิค
3. D1 เบอร์ 1N4148
4. D2 เบอร์ 1N4733
5. IC1 ออปแอมเบอร์ LM308N
6. Q1 , Q2 ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP เบอร์ BC558
7. R1 , R3 ค่า 10 kΩ 1/2 W ±5%
8. R2 ค่า 100 Ω 1/2 W ±5%
9. R4 ค่า 910 kΩ 1/4 W ±5%
10. R5 ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ 10 kΩ
11. R6 , R7 ค่า 100 kΩ 1/2 W ±5%
12. R8 ค่า 470 kΩ
13. R9 ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ 100 kΩ
14. S1 สวิตช์

การทำงานของวงจรนี้คือ เมื่อเปิดสวิตช์ วงจรจ่ายกระแสคงที่ จะทำการจ่ายกระแสให้แก่ D2 ซึ่งเป็นซีเนอร์ไดโอด เพื่อรักษาแรงดันที่ตกคร่อม D1 และ R1 ให้คงที่ที่ 5.1 โวทล์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม D1 เปลี่ยนแปลงไป สมมุติว่า หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม D1 ลดลง จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม R1 เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อม D1 และ R1 ต้องเท่ากับ 5.1 โวทล์ตลอด เมื่อแรงดันที่ตกคร่อม R1 เพิ่มขึ้นทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัว R1 เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้มีกระแสไหลผ่าน R7 , R8 และ R9 มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลให้อัตราขยายมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันที่เอาท์พุทเพิ่มขึ้น ซึ่งเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตรงกับอุณหภูมิ คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แรงดันที่เอาท์พุทก็เพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางตรงกันข้าม หากอุณหภูมิลดลง จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม D1 เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันที่ตกคร่อม R1 ลดลง และกระแสที่ไหนผ่าน R1 ก็ลดลงไปด้วย เป็นผลให้กระแสที่ไหลผ่าน R7 , R8 และ R9 มีค่าลดลงทำให้แรงดันที่เอาท์พุทลดลงไปด้วย ซึ่งก็แปรผันตรงกับอุณหภูมิเช่นเดียวกัน คือ อุณหภูมิลดลง แรงดันที่เอาท์พุทก็ลดลงด้วย

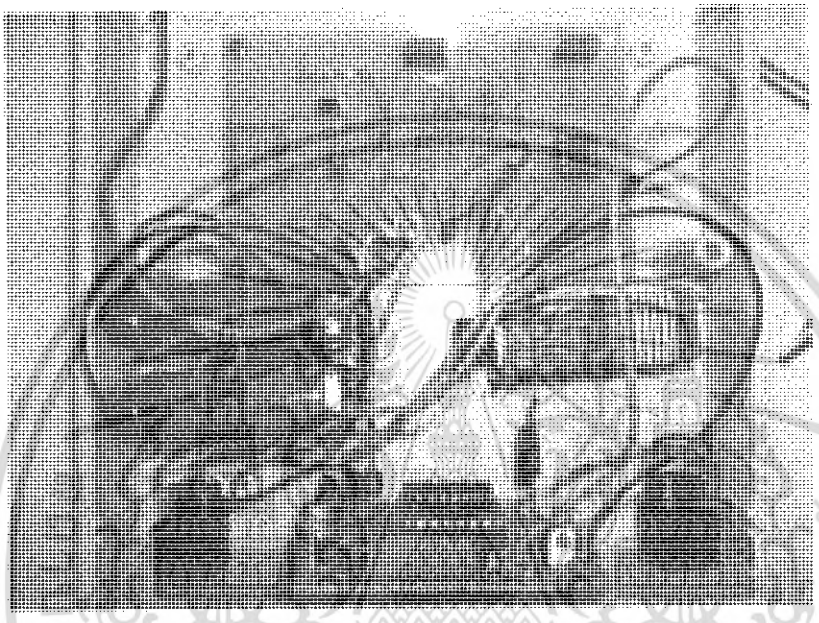
สำหรับการปรับแต่งวงจรให้สามารถอ่านค่าได้โดยง่าย ขั้นแรกต้องมีแหล่งอ้างอิงอุณหภูมิที่รู้ค่าแน่นอน 2 ค่า และทำการนำเซ็นเซอร์ไดโอด ไปวัดแหล่งอ้างอิงอุณหภูมิทั้งสอง การวัดทั้งสองค่านี้ จะต้องได้ค่าแรงดันมีค่าเท่ากับความต่างของอุณหภูมิจริงคูณด้วย 0.01 หากไม่เป็นตามนี้ให้ทำการปรับ R9 ไปจนกว่าจะได้ความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง ซึ่งขั้นนี้คือการปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เอาท์พุทให้เหมาะสม ต่อจากนั้นก็ทำการปรับเพื่อให้ได้แรงดันที่เอาท์พุทมีค่าที่สามารถอ่านได้จริง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิจริง เช่น ถ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะต้องปรับให้มีแรงดันที่เอาท์พุทเป็น 0.25 โวลท์ หากไม่ได้ ให้ปรับค่า R5 จนแรงดันที่เอาท์พุทถูกต้อง ซึ่งรูปแสดงลายวงจรแผ่นปริ้นท์ได้ดังนี้



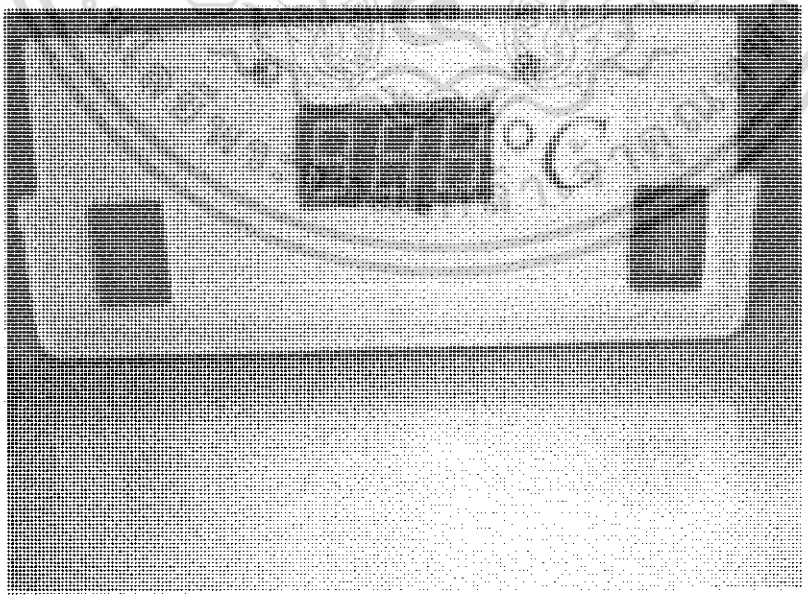
รูปที่ 4.35 ลายวงจรและการวางอุปกรณ์ของ Thermal Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งวงจรข้างต้นที่ต่อร่วมกับไดโอดนั้นแสดงให้เห็นชัดเจนถึงประโยชน์ของคุณสมบัติเชิงเส้น เนื่องจากหากเป็นเซ็นเซอร์ชนิดอื่นที่สัญญาณที่แปลงไปตามอุณหภูมินั้นไม่เป็นเชิงเส้น จะไม่สามารถนำมาใช้กับวงจรแบบนี้ได้ เนื่องจากสัญญาณที่แปลงมาจากอุณหภูมิต้องมีการเปลี่ยนแปลงที่คงที่ เช่น ไดโอด ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงทุก 1 องศาเซลเซียส แรงดันจะเปลี่ยนแปลงไป 2 mV คงที่ตลอด



รูปที่ 4.36 ส่วนภายในเครื่องเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.37 ส่วนแสดงผลของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.38 หัววัดเซนเซอร์อุณหภูมิที่ได้จากการสร้าง

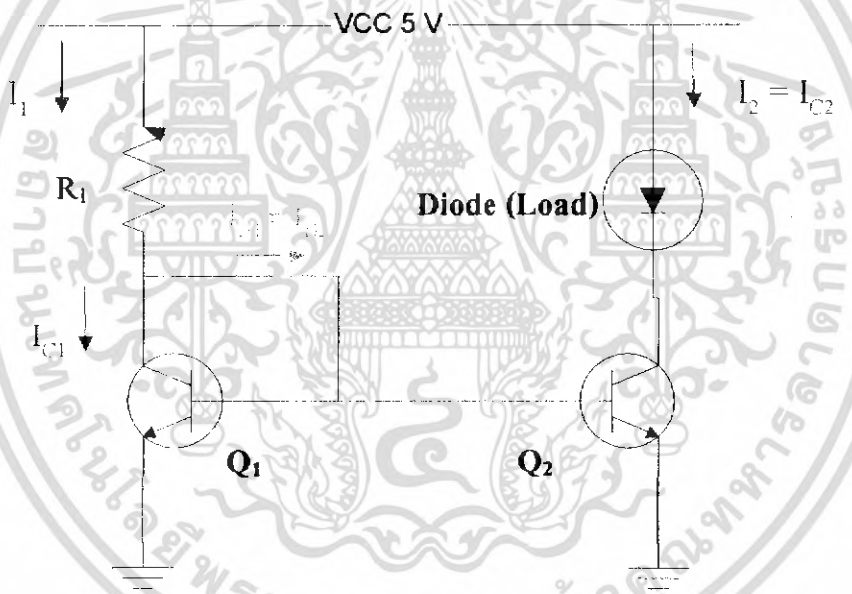
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดคุณสมบัติระหว่างอุณหภูมิและแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดชนิดต่าง ๆ , การสร้างไดโอดและวงจรที่ใช้ร่วมกับ Thermal Diode ในการแสดงผลให้ผู้อ่านสามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ จากทฤษฎีที่ว่าเมื่ออุณหภูมิที่ตกคร่อมรอยต่อของไดโอดเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งไดโอดต่างชนิดกันจะได้คุณสมบัติระหว่างอุณหภูมิและแรงดันแตกต่างกันไป และในการทดลองจะทำการไบอัสไดโอดที่ใช้การทดลองด้วยวงจรจ่ายกระแสคงที่ แล้วจึงวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

5.1 วงจรจ่ายกระแสคงที่



รูปที่ 5.1 วงจรจ่ายกระแสคงที่

จากวงจร Q_1 และ Q_2 เป็นทรานซิสเตอร์เบอร์เดียวกัน ดังนั้นจะสามารถสมมุติได้ว่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองนั้นเหมือนกัน ดังนั้น

$$I_{C1} = I_{C2}$$

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2}$$

$$I_{C1} = I_1 - I_{B1} - I_{B2}$$

จาก

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{I_{C1}}{\beta} = \frac{I_{C2}}{\beta}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $$I_{C1} = I_1 - \left(\frac{2}{\beta}\right) I_{C1}$$

จาก $$I_2 = I_{C1} = I_{C2}$$

จะได้ $$I_2 = I_1 - \left(\frac{2}{\beta}\right) I_2$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)}$$

$$I_2 = I_1\left(1 - \frac{2}{2+\beta}\right) \qquad 5.1$$

จากสมการที่ 5.1 จะเห็นว่า I_2 ซึ่งเป็นค่ากระแสที่เราต้องการจ่ายให้ไดโอดนั้นจะขึ้นอยู่กับ I_1 และ β และจากวงจรด้านบนจะได้

$$I_1 = \frac{Vcc}{R_1} \qquad 5.2$$

เมื่อ β คือ อัตราขยายของทรานซิสเตอร์

Vcc คือ แรงดันที่จ่ายให้วงจร

จากสมการที่ 5.2 ค่า I_1 จะขึ้นกับค่า R_1 ดังนั้น R_1 คือตัวกำหนดกระแสที่จ่ายให้ไดโอด เพราะ $I_2 \propto I_1 \propto \frac{1}{R_1}$ ดังนั้นจะสามารถออกแบบวงจรจ่ายกระแสคงที่ได้โดยใช้สมการ 5.1 และสมการ 5.2 ค่ากระแสที่ต้องการคือ $10\mu A$ ถึง 1mA ดังนั้นจะได้

จากสมการที่ 5.1 แทนค่า $$10\mu A = 11\mu A\left(1 - \frac{2}{2+\beta}\right)$$

คำนวณได้ค่า $\beta = 20$ จึงเลือกใช้ ทรานซิสเตอร์เบอร์ BD245

จากสมการที่ 5.2 ต้องการ $I_2 = 10\mu A$ แทนค่า $$11\mu A = \frac{5}{R_1}$$

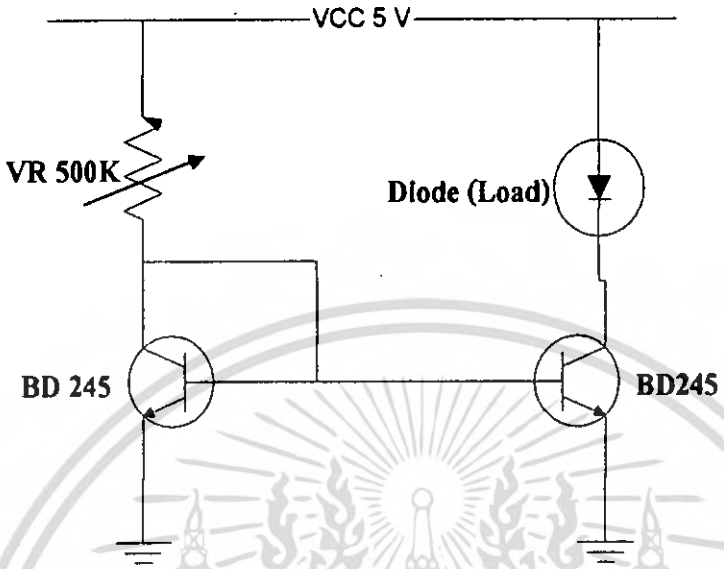
คำนวณได้ค่า $R_1 = 454\ K\Omega$

จากสมการที่ 5.2 ต้องการ $I_2 = 1mA$ แทนค่า $$11mA = \frac{5}{R_1}$$

คำนวณได้ค่า $R_1 = 454\ \Omega$

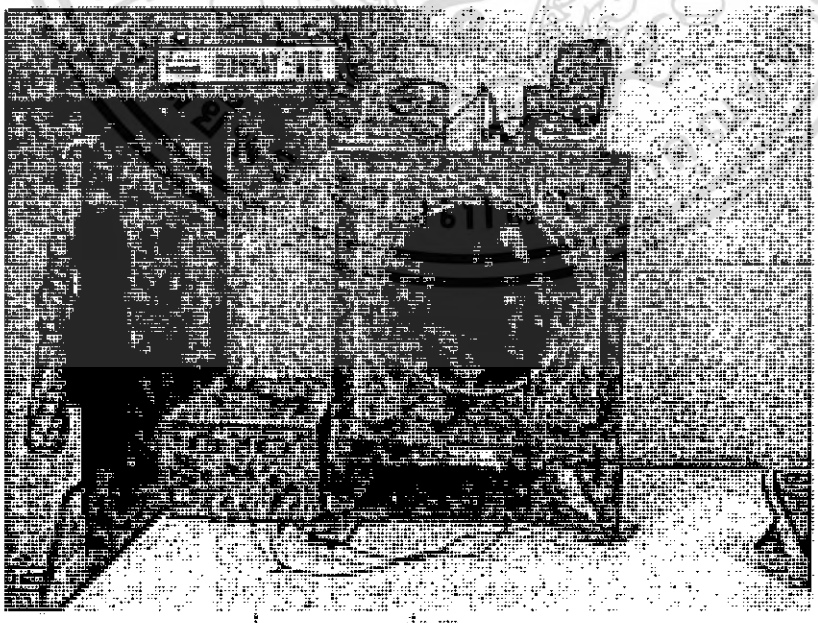
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นต้องใช้ค่า R_t ที่สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 454 Ω ถึง 454 $K\Omega$ จึงเลือกใช้ R_t เป็นค่าความต้านทานปรับค่าได้ 500 $K\Omega$ จะได้รูปวงจรที่ใช้ในการทดลองจริงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 5.2 รูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองจะต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 และทำการเปลี่ยนชนิดของไดโอด 3 ชนิด คือ PN Diode เบอร์ 1N4148 , Schottky Diode เบอร์ 1N5819, LED เมื่อต่อวงจรดังรูปจะจ่ายกระแสให้ไดโอดค่า 10 μA , 100 μA และ 1 mA เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณกระแสที่มีต่อไดโอดขณะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่าต่าง ๆ และในที่ค่ากระแสต่าง

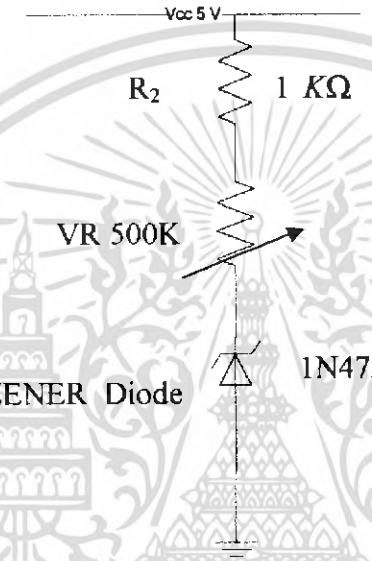


รูปที่ 5.3 เตาอบที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการทดลองจะต่อวงจรจ่ายกระแสคงที่ และไดโอดที่จะใช้ในการทดลองนั้นจะนำมาต่อสายไฟที่มีความยาวมากพอที่จะสอดเข้าไปในเตาอบทางช่องเล็ก ๆ ได้ และนำเทอร์โมมิเตอร์มาวัดอุณหภูมิภายในเตาอบ สังเกตอุณหภูมิและบันทึกว่าแรงดันที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าเป็นอย่างไร เมื่อเสร็จแล้ว ก็ทำการเปลี่ยนค่ากระแสที่ไบอัสให้แก่ไดโอด นำไปอบในเตาอบอีกครั้ง และบันทึกค่าแรงดันที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ส่วนการทดลองใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นเซ็นเซอร์อุณหภูมินั้น จะต่อวงจรดังรูปที่ 5.4 เพราะซีเนอร์ไดโอดนิยมใช้ในขณะที่รอยต่อพังทลายแล้ว



รูปที่ 5.4 วงจรที่ใช้ทดลองซีเนอร์ไดโอด

ค่า R_2 มีค่า 1 $K\Omega$ นำมาต่อเพื่อป้องกันไม่ให้ซีเนอร์ไดโอดเสียหาย เนื่องจากหากไม่ต่อ R_2 และทำการปรับ VR ผิดพลาดแล้วค่า VR = 0 Ω จะเกิดกระแสปริมาณมากไหลผ่าน ซีเนอร์ไดโอด ทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวซีเนอร์ไดโอดได้

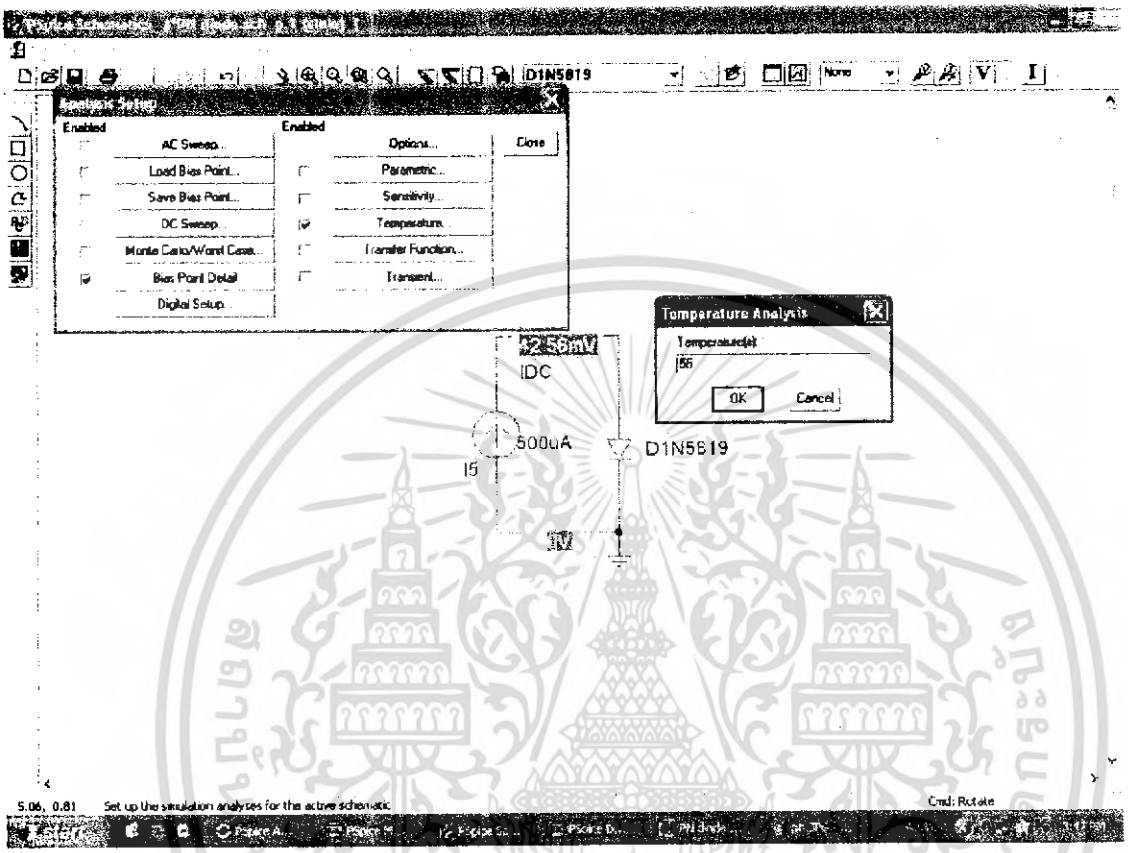
เมื่อต่อวงจรดังรูปที่ 5.4 แล้ว ทำการปรับค่า VR จนได้กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมีค่า 4 mA และนำซีเนอร์ไดโอดไปใส่ในเตาอบและทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ตกคร่อมไดโอด แล้วจึงทำการบันทึกผลเช่นเดียวกับการทดลองไดโอดชนิดอื่น

เมื่อได้ผลการทดลองแล้ว จึงนำไปพล็อตกราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อของไดโอดชนิดต่าง ๆ ที่ค่ากระแสต่าง ๆ กัน จากนั้นจึงนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาว่าไดโอดชนิดใดเหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นเซนเซอร์มากที่สุด

เมื่อทำการทดลองวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันแล้ว ก็นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรมจำลองการทำงานของวงจร ซึ่งโปรแกรมที่ใช้นั้นคือโปรแกรม Pspice ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถจำลองการทำงานของวงจรและสามารถจำลองการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อีกด้วยดังรูปที่ 5.5 เนื่องจากวงจรที่ใช้ต่อทดลองจริงเป็นวงจรจ่ายกระแสคงที่ ในโปรแกรมจึงใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่แทน



รูปที่ 5.5 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อไดโอด

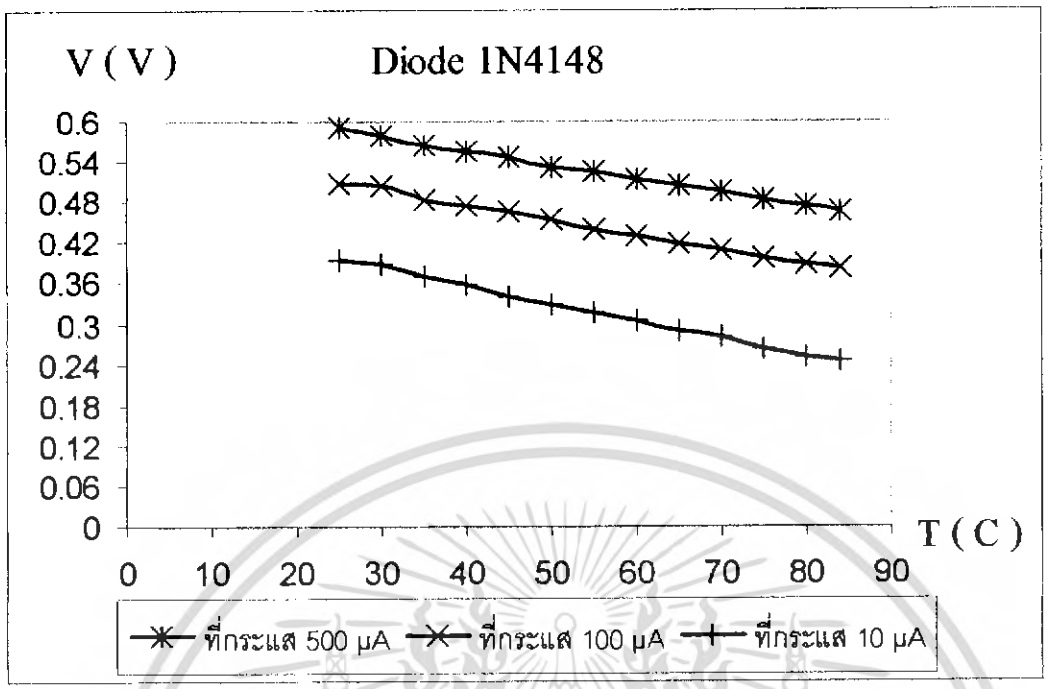
5.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองนี้จะแสดงถึงการวัดค่าแรงดันกับอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงไป เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าไดโอดทั้ง 4 ชนิด คือ ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ซีเนอร์ไดโอด ช็อตต์คีย์ไดโอด และไดโอดเปล่งแสงว่าไดโอดชนิดใดมีความไวกับอุณหภูมิเป็นอย่างไร โดยจะนำเสนอในรูปของกราฟแรงดันที่ตกคร่อมขาของไดโอดเป็นแกน Y และอุณหภูมิเป็นแกน X

5.2.1 ผลการทดลองส่วนที่หนึ่ง กราฟที่ให้กระแสแก่ไดโอดที่ค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการทดลอง

ในส่วนของกราฟส่วนแรกจะมีการนำเสนอในด้านของการเปรียบเทียบกระแสที่จ่ายให้ไดโอดแต่ละชนิดที่ค่าต่าง ๆ กันที่ได้จากการทดลองคือ ที่ 10 uA , 100 uA , และ 500 uA ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น 1N4148 ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการทดลอง

จากรูปกราฟเมื่อนำมาพิจาณาจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันที่วัดมีค่าลดลง โดยจะพิจารณาได้จากสมการ

$$V = (\frac{kT}{q}) \ln(\frac{I}{I_0} + 1)$$

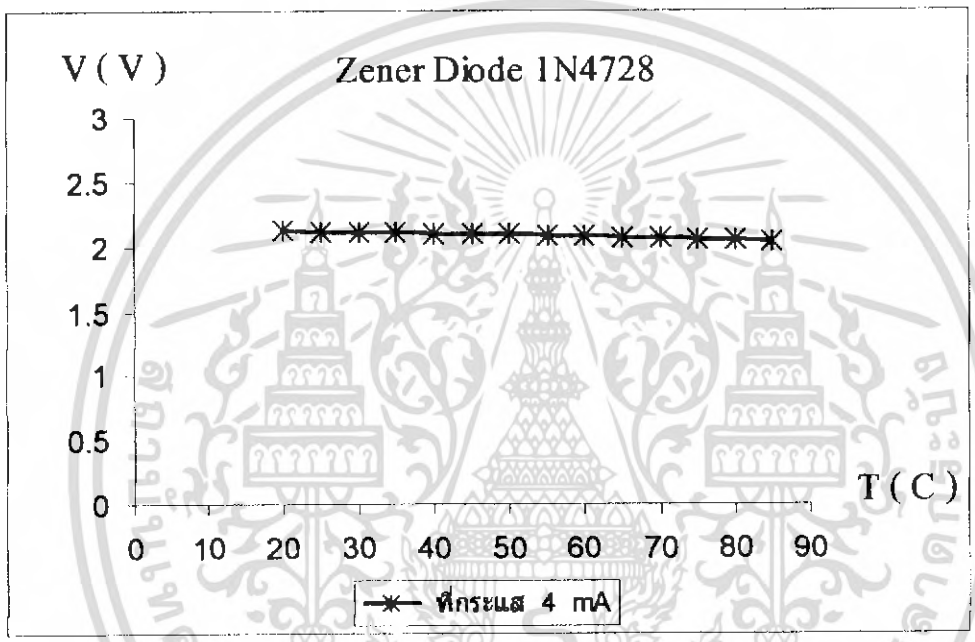
จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับอุณหภูมิ ($T^{\circ}C$) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นค่าตัวแปรอื่น ๆ ที่อยู่ในสมการนั้นจะเป็นค่าคงที่นอกจากค่าของอุณหภูมิและค่าของกระแสรั่วไหล (I_0) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิหรือจะกล่าวได้คือเมื่อมีการทำการเพิ่มอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นค่าของกระแสรั่วไหล (I_0) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลในการเพิ่มขึ้นของค่าของกระแสรั่วไหล (I_0) ที่เพิ่มขึ้นนี้มีผลมากกว่าอุณหภูมิด้วยตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทของทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ จะทำให้ได้ว่าค่าแรงดันที่ได้นั้นมีค่าลดลงเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้ก็จะมีแนวโน้มเดียวกับค่าแรงดันที่ได้ทำการวัด

และนอกจากนั้นเมื่อพิจารณากราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสที่จ่ายให้กับไดไอดที่ค่า 10 uA , 100 uA , และ 500 uA แล้วจะเห็นว่าเมื่อค่ากระแสที่จ่ายให้กับไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันที่วัดได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยพิจารณาได้จากสมการเดิมคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = (\frac{kT}{q}) \ln(\frac{I}{I_0} + 1)$$

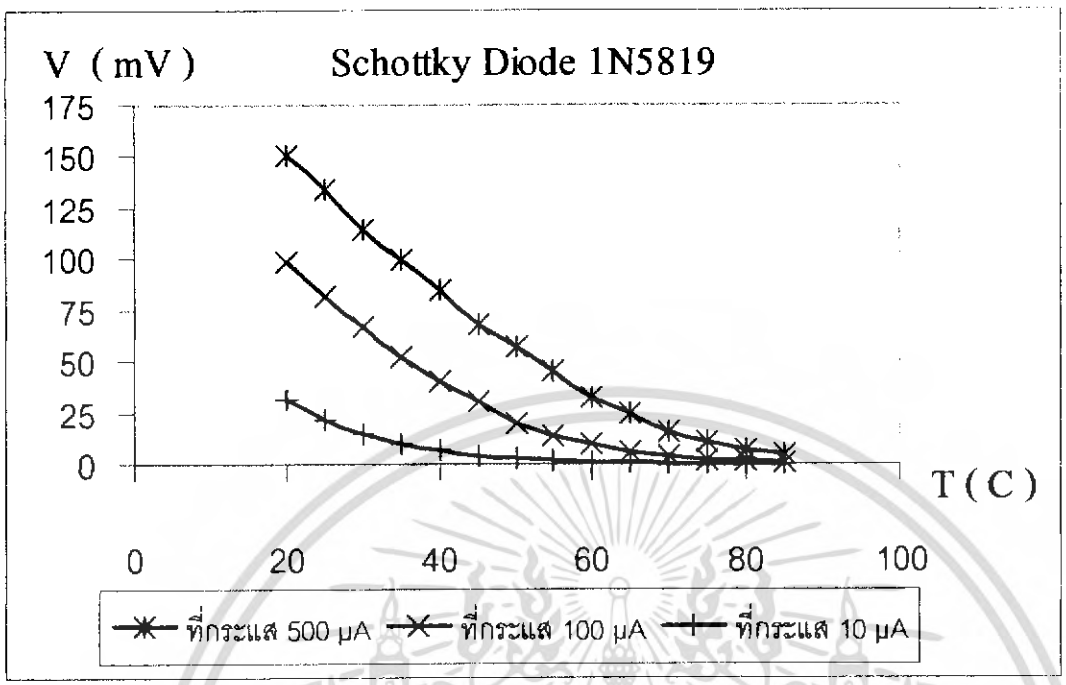
จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรอื่นในสมการจะเป็นค่าคงที่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่ค่า ๆ หนึ่ง ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนค่ากระแสที่ทำการไบอัสให้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของเทอม $\ln(\frac{I}{I_0} + 1)$ มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันที่วัดได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ด้วยเงื่อนไขนี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยจะกล่าวได้คือเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสให้มีค่ามากขึ้นก็จะมีผลทำให้ไดโอดสามารถวัดช่วงของอุณหภูมิได้กว้างขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5.7 กราฟของซีเนอร์ไดโอด (1N4728) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสย้อนกลับ 4 mA ที่ได้จากการทดลอง

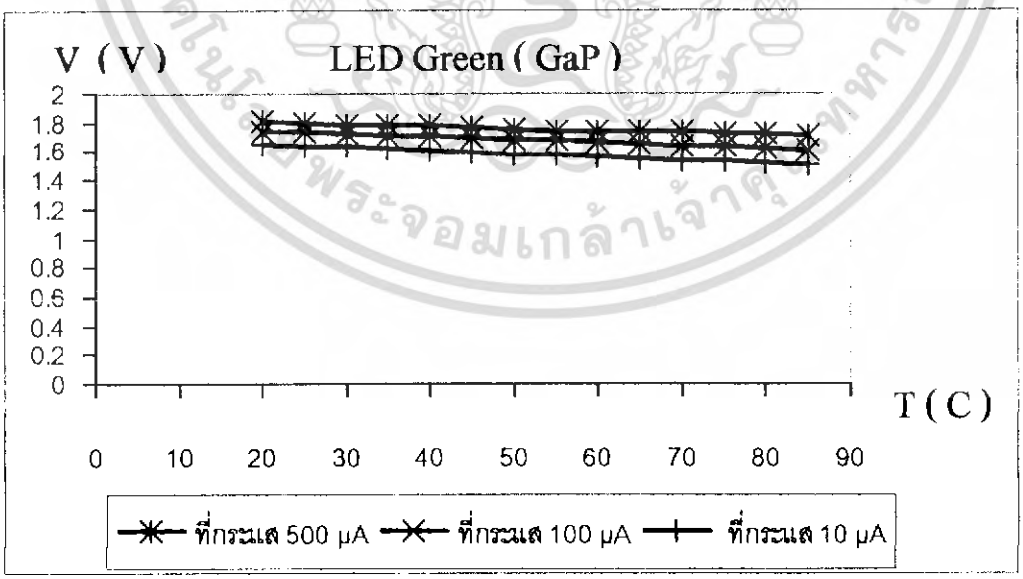
จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการวัดแรงดันไบอัสย้อนกลับซึ่งค่าแรงดันเป็นค่าแรงดันพังทลาย ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมินั้นค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะมีค่าน้อยมาก เพราะเป็นผลมาจากค่าแรงดันที่ทำการวัดนั้นเป็นค่าแรงดันพังทลาย ซึ่งโดยปกติแรงดันพังทลายนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ถึงแม้จะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 กราฟของชื่อตต์คีย์ไดโอด (1N5819) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟก็จะเห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นแล้วค่าแรงดันที่วัดได้นั้น ลดลงเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียลเพราะผลของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวที่เพิ่มขึ้น และเทอมของเทอมของความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวแปรผันตรงกับความอุณหภูมิกำลังสอง



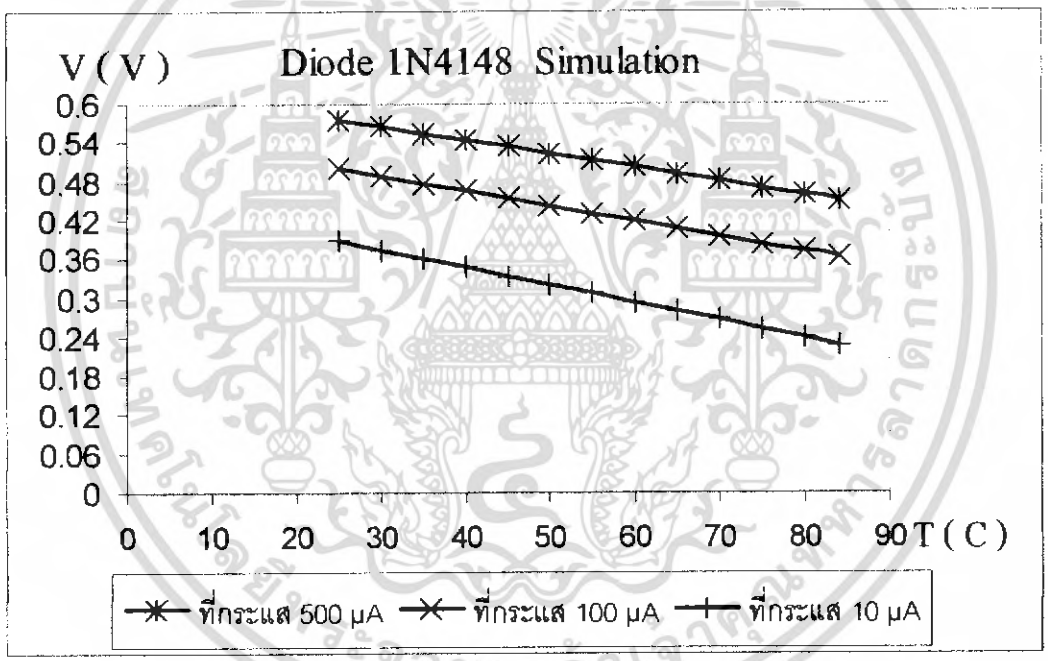
รูปที่ 5.9 กราฟของไดโอดเปล่งแสง (LED : GaP) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กันที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในส่วนของไดโอดเปล่งแสงจะเห็นว่าผลที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น แต่ที่ต่างกันคือค่าของความชัน ซึ่งผลตรงนี้มาจากค่าความกว้างแถบช่องว่างพลังงานที่ต่างกัน ซึ่งไดโอดเปล่งแสงจะมีค่าความกว้างแถบช่องว่างพลังงานมากกว่า

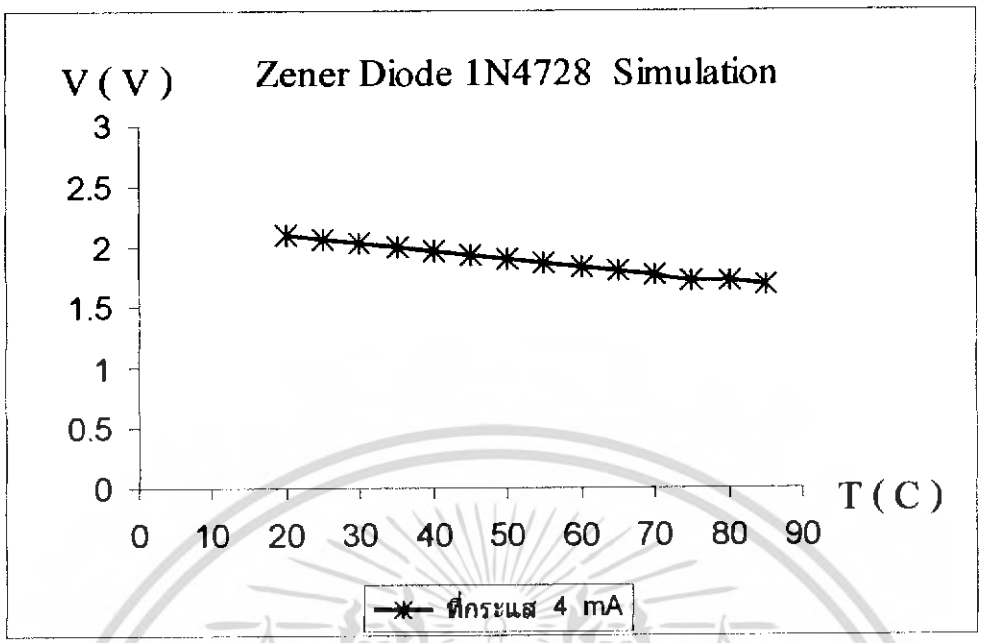
5.2.2 ผลการทดลองส่วนที่สอง กราฟที่ให้กระแสแก่ไดโอดที่ค่าต่าง ๆ กันที่ได้จากการซิมมูเลชั่น

ในส่วนของกราฟส่วนสองจะมีการนำเสนอในด้านของการเปรียบเทียบกระแสที่จ่ายให้ไดโอดแต่ละชนิดที่ค่าต่าง ๆ กันที่ได้จากการซิม ที่ 10 uA , 100 uA , และ 500 uA ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง

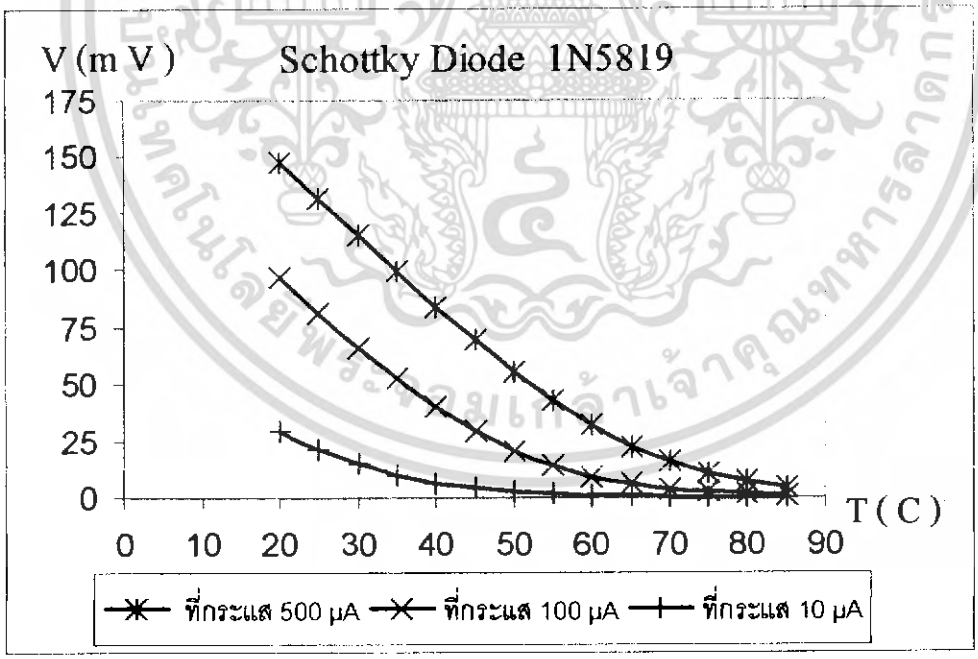


รูปที่ 5.10 กราฟของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น 1N4148 ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กันที่ได้จากการซิมมูเลชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

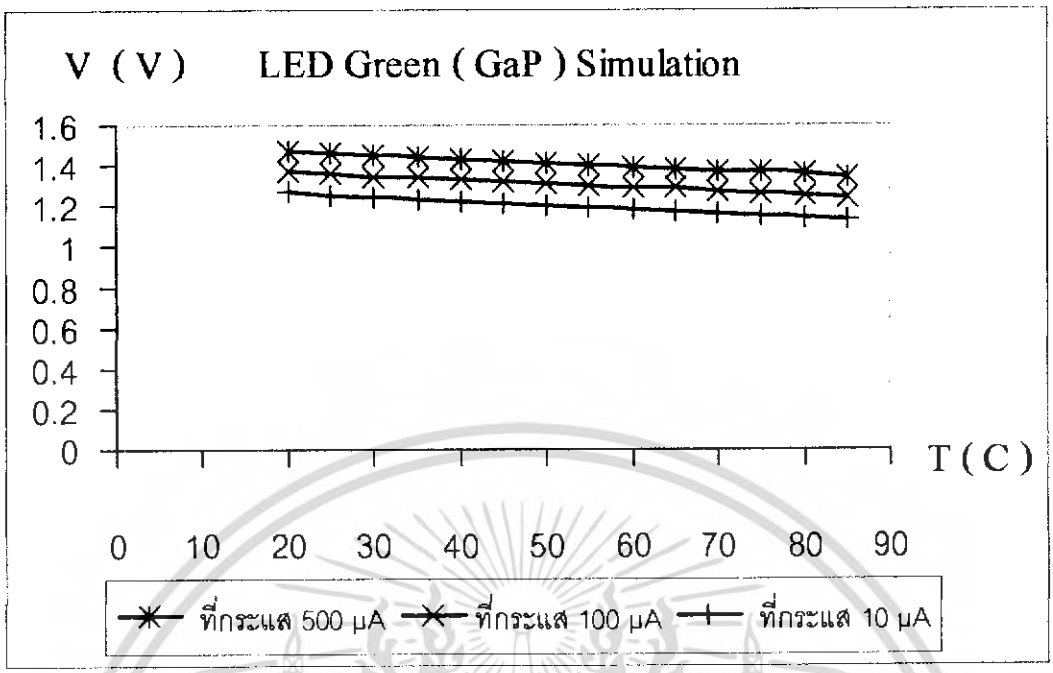


รูปที่ 5.11 กราฟของซีเนอร์ไดโอด (1N4728) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสย้อนกลับ 4 mA ที่ได้จากการซิมมูเลชั่น



รูปที่ 5.12 กราฟของช็อตต์คีย์ไดโอด (1N5819) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการซิมมูเลชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



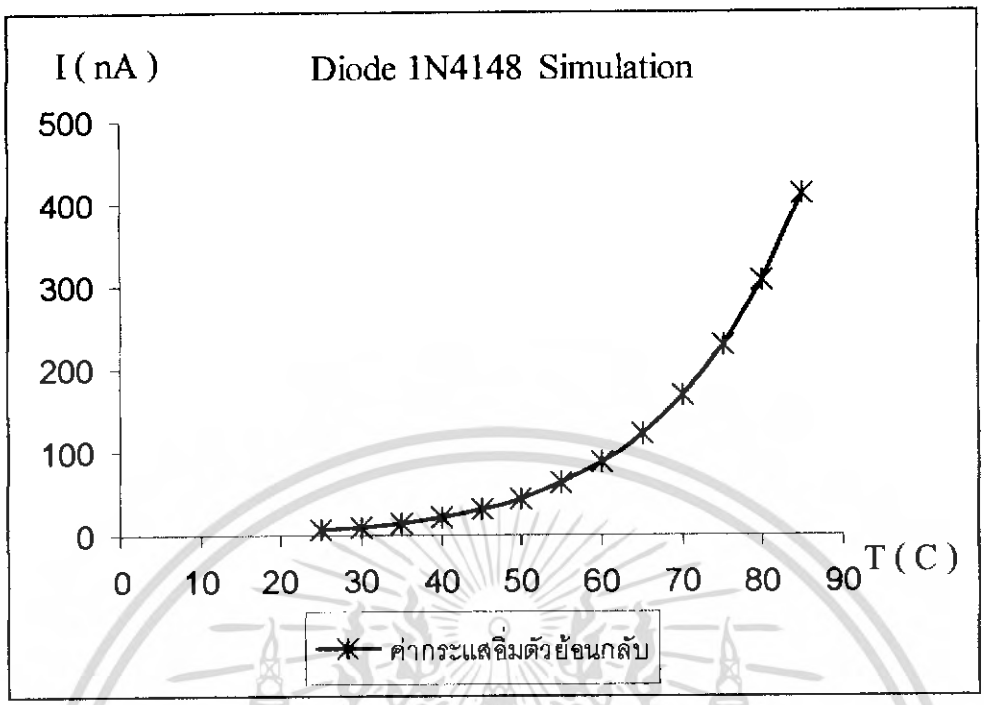
รูปที่ 5.13 กราฟของไดโอดเปล่งแสง (LED : GaP) ที่ให้ค่ากระแสไบอัสค่าต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการซิมมูเลชั่น

จากกราฟทั้ง 4 รูปคือ ตั้งแต่รูป 5.10 – 5.13 นั้นจะเป็นผลที่ได้มาจากการซิมมูเลชั่น และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นแล้วแรงดันจะเปลี่ยนไปในทิศทางที่ลดลง ซึ่งผลที่ได้จากการซิมมูเลชั่นนั้นก็มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองที่วัดได้

5.2.3 ผลการทดลองในส่วนที่สาม กราฟของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับอุณหภูมิ

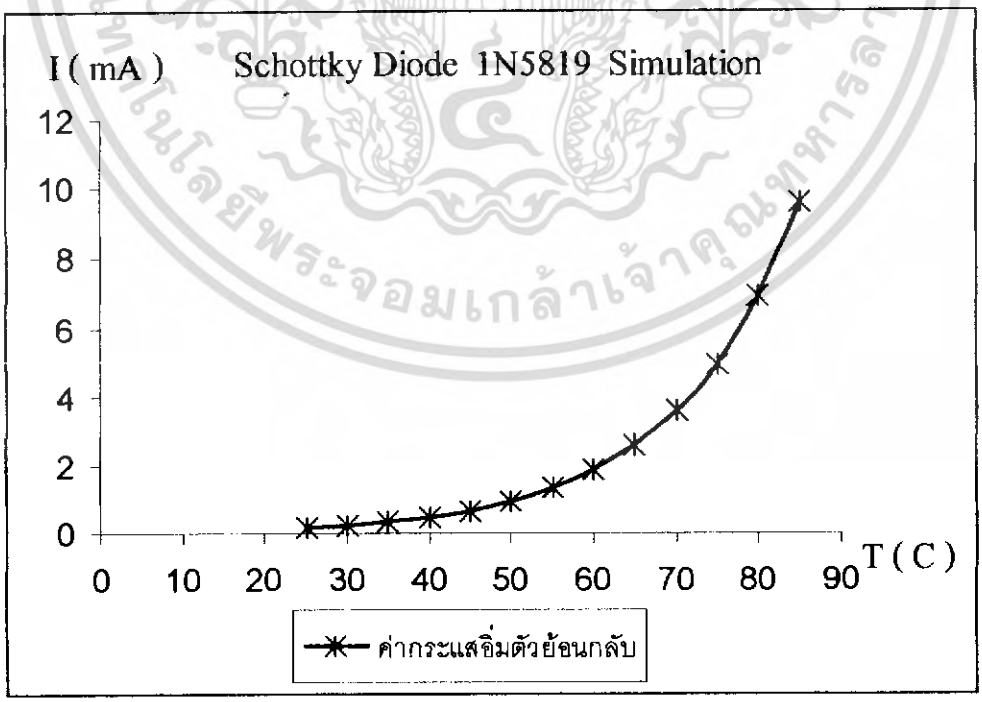
ในส่วนนี้จะทำการทดลองวัดค่าของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ แล้วนำพล็อตกราฟก็จะได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กราฟของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับอุณหภูมิของ P-N Diode

จากกราฟก็จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับนั้นก็จะเพิ่มตามอุณหภูมิแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะได้ทำการวัดเฉพาะรอยต่อ P-N Diode ส่วน LED และ Zener จะคล้ายกันเพราะเป็นรอยต่อแบบ P-N Diode ซึ่งจากการกราฟนี้แสดงให้เห็นได้ว่าค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิอย่างมาก



รูปที่ 5.15 กราฟของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับอุณหภูมิของ Schottky diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟก็จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับก็จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งผลที่ได้ก็คล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อ P-N

5 .2.4 ผลการทดลองในส่วนที่สาม ตารางแสดงการเปรียบเทียบความไวของอุณหภูมิกับไดโอดแต่ละชนิด

การเปรียบเทียบความไวของอุณหภูมิแต่ละชนิดจะใช้วิธีการเปรียบเทียบความชันที่ทำการให้ค่ากระแสที่ค่าหนึ่ง ๆ ในไดโอดแต่ละชนิดแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

$$\text{Sensitivity} = (Y - Y_1) / (X - X_1)$$

กระแส	Sensitivity (mV / °C)			
	Diode 1N4148	Zener 1N4728	Schottky 1N5819	LED (GaP)
500 uA	- 2.05	ไม่ได้ทำการวัด	มีค่าความชันไม่คงที่	- 1.4
100 uA	- 2.083	ไม่ได้ทำการวัด	มีค่าความชันไม่คงที่	-2.0
10 uA	- 2.48	ไม่ได้ทำการวัด	มีค่าความชันไม่คงที่	- 2.4
4 mA	ไม่ได้ทำการวัด	- 1.23	ไม่ได้ทำการวัด	ไม่ได้ทำการวัด

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าความชันที่ค่ากระแสต่าง ๆ

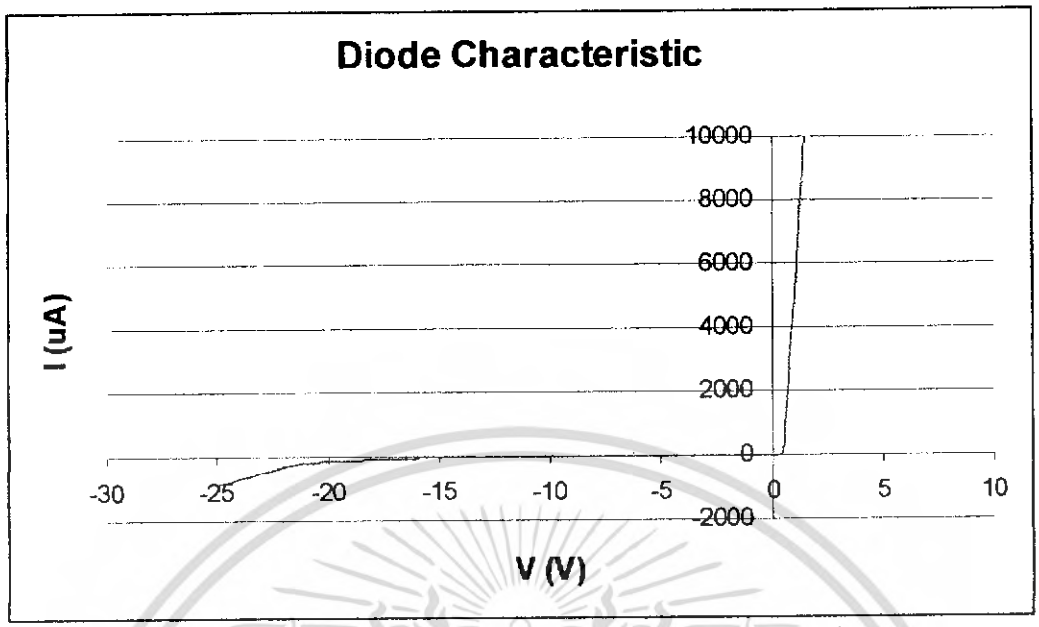
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางเมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสคงที่ค่าหนึ่ง ๆ เช่น ที่ค่ากระแส 500 uA จะเห็นว่าที่ค่ากระแสนี้ค่าความไวของไดโอดคือ 0.00205 ของช็อตต์คีย์ไดโอดไม่สามารถหาค่า Sensitivity ได้ ไดโอดเปล่งแสงมีค่าความไวคือ 0.0014 ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าถ้าค่าความชันมีค่าสูงนั้นจะหมายความว่าไดโอดชนิดนั้นมีความไวต่ออุณหภูมิมากที่สุดหรือจะพูดอีกอย่างหนึ่งว่าเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไดโอดชนิดที่มีค่าความชันมากก็จะเปลี่ยนแปลงมากตามไปด้วย ซึ่งในที่นี้ได้ใช้แรงดันเป็นตัวแสดงผล จึงจะสรุปได้ว่าไดโอดที่มีค่าความชันมากสุดจะเหมาะแก่การนำไปสร้างเป็นไดโอดตรวจวัดอุณหภูมิมากที่สุด ซึ่งในที่นี้เมื่อดูผลจากค่าความชันซึ่งได้มาจากกราฟแล้วจะเห็นว่าไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นธรรมดาจะมีค่าความชันมากกว่าไดโอดเปล่งแสง ซึ่งได้ตรงกับแนวโน้มที่ได้กล่าวไว้ ส่วนช็อตต์คีย์ไดโอดนั้นจะเห็นว่าหาค่าความชันไม่ได้เพราะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้แรงดันเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น จึงไม่เหมาะสม และซีเนอร์ไดโอดจะเห็นว่าเมื่อให้ไบอัสย้อนกลับ ค่าความไวจะมีค่าน้อยมากเพราะเป็นคุณสมบัติของทางด้านแรงดันพังทลายหรือจะกล่าวได้คือเมื่อซีเนอร์ไดโอดพังทลาย ค่าแรงดันที่ตกคร่อมนั้นจะมีค่าลดลงน้อยมาก ซึ่งสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะสม ทำให้สรุปแล้วจะกล่าวได้ว่าไดโอดที่เหมาะสมแก่การนำมาสร้างเป็นไดโอดตรวจวัดอุณหภูมิมากที่สุดคือ ไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ธรรมดา

5.2.5 ผลการทดลองของเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ

รูปกราฟที่ 5.16 เป็นเส้นกราฟแสดงลักษณะของไดโอดพีเอ็นที่สร้างขึ้นจริงจากห้องปฏิบัติการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเส้นกราฟที่ได้นั้น แสดงคุณสมบัติความเป็นไดโอดที่ดี แต่อาจมีแรงดันพังทลายที่น้อยกว่าไดโอดพีเอ็นทั่วๆไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



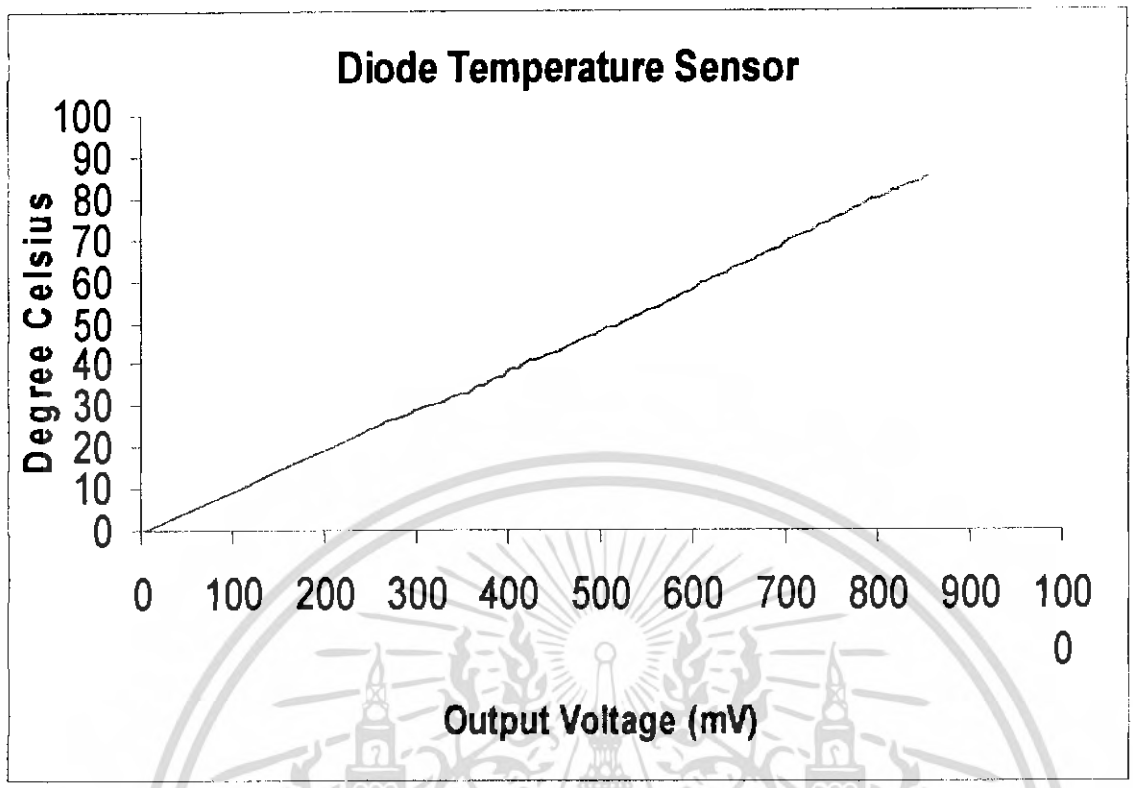
รูปที่ 5.16 เส้นกราฟแสดงคุณลักษณะของไดโอดที่สร้างขึ้น

ส่วนต่อมาจะเป็นผลการทดลองเมื่อนำเซ็นเซอร์ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นต่อเข้ากับวงจรและวงจรไฟฟ้าที่สร้างขึ้นแล้วมาทำการวัดอุณหภูมิโดยทำการวัดที่ 8 ^{0}C (นำหัวเซ็นเซอร์เข้าตู้เย็น) และ 25-85 ^{0}C (นำหัวเซ็นเซอร์เข้าเตาอบ) ซึ่งผลที่ได้จะเป็นดังกราฟ

จากรูปที่ 5.17 จะเห็นได้ว่า เมื่อต่อไดโอดเข้าวงจรไฟฟ้าที่สร้างขึ้นแล้ว รูปกราฟที่ได้เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งมีความไวซึ่งก็คือความชัน 9.8 mV / องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันที่ทางออกก็มีค่ามากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลงแรงดันที่ทางออกก็มีค่าลดลง โดยมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงองศาเซลเซียสละ 9 .8 mV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้คือ 10 mV และมีค่าอุณหภูมิที่ทางออกค่อนข้างใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริง โดยที่อุณหภูมิบางค่าอาจมีค่าผิดพลาดไปประมาณ 1-3 ^{0}C

อย่างไรก็แล้วแต่ ผลการทดลองเมื่อเอาไดโอดไปต่อกับวงจรไฟฟ้าที่สร้างขึ้นแล้ว แรงดันที่ทางออกมีความเป็นเชิงเส้นดี และสามารถแสดงผลได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิของเซ็นเซอร์ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เซ็นเซอร์อุณหภูมิในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป โดยที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ เทอโมคัปเปิล , เทอร์มิสเตอร์ , RTD และ Thermal diode ซึ่ง Thermal diode นั้นทำมาจากสารกึ่งตัว เทคโนโลยีในปัจจุบันการสร้าง Diode จะมีราคาถูก , มีขนาดเล็ก และกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยาก เพราะเป็นเพียงการนำสารกึ่งตัวนำสองชนิดมาสัมผัสกัน ในที่นี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดแต่ละชนิด ซึ่งได้ทำการศึกษา ไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น , ช็อตต์คีย์ไดโอด , LED และซีเนอร์ไดโอด

จากผลการทดลองในบทที่ 5 จะเห็นได้ว่าไดโอดทุกชนิด เมื่อทำการไบอัสแล้วจะให้อุณหภูมิแก่ไดโอดเพิ่มขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม Pspice โดยการลดลงของแรงดันของไดโอดแต่ละชนิดจะต่างกัน ดังนี้

เมื่อให้ไบอัสตรงกับช็อตต์คีย์ไดโอด แรงดันที่ตกคร่อมช็อตต์คีย์ไดโอดจะมีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมช็อตต์คีย์ไดโอดจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งการลดลงนี้ไม่ใช่การลดลงแบบเชิงเส้นจึงสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก โดยสมการที่ใช้นำมาพิจาณาคือ $V = (\frac{kT}{q})\ln(\frac{J}{J_0}+1)$ และ $J_0 = A^*T^2\exp(\frac{-q\phi_{bn}}{k_BT})$ จากสองสมการนี้จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพราะจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวจะแปรกับอุณหภูมิยกกำลังสองแล้วเมื่อนำลงไปแทนจะทำให้เทอมของ $\ln(\frac{J}{J_0}+1)$ ลดลงและมากกว่าผลของเทอม $(\frac{kT}{q})$ อย่างมากทำให้แรงดันที่ได้มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วแบบไม่เป็นเชิงเส้น และผลการทดลองที่ได้ก็เป็นไปตามทฤษฎี

เมื่อให้ไบอัสตรงกับไดโอดเปล่งแสง แรงดันที่ตกคร่อมก็จะมีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดเปล่งแสงก็จะมีค่าลดลง ซึ่งผลที่ได้นี้ก็จะเหมือนกับกรณีของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น แต่จะมีความแตกต่างกันที่ค่าความกว้างแถบช่องว่างพลังงานของสารที่นำมาใช้ในการสร้างไดโอด โดยค่าความกว้างแถบช่องว่างพลังงานของไดโอดเปล่งแสงนั้นจะมีค่ามากกว่าไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นธรรมดา และจะพิจารณาจากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n_i = KT^{\frac{3}{2}} \exp(-\frac{E_g}{2kT})$ ซึ่งผลจากค่าที่ความกว้างแถบช่องว่างพลังงานนี้มีค่ามากจะทำให้เทอม ของ $\exp(-\frac{E_g}{2kT})$ ลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นอินทรินซิคมีค่าลดลงด้วย และผลที่ค่าความหนาแน่นอินทรินซิคลดลงนี้เวลานำไปยกกำลังสองแล้วก็จะมีค่าน้อยตามและเมื่อนำลงไปแทนในสมการ $I_0 = qAn_i^2(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D})$ แล้วนำค่ากระแสรั่วไหลไปแทนลงใน $V = (\frac{kT}{q})\ln(\frac{J}{J_0}+1)$ ค่าแรงดันที่ได้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น แรงดันนั้นก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้ก็มีความสอดคล้องกับทางด้านทฤษฎี

เมื่อให้ไบอัสย้อนกลับแก่ซีเนอร์ไดโอด จนเกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ ซึ่งการพังทลายแบบนี้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมซีเนอร์ไดโอดจะลดลงตามทฤษฎี จากผลการทดลองก็เป็นไปตามทฤษฎี แต่การเปลี่ยนของแรงดันกับอุณหภูมิของซีเนอร์ได้โอดนั้น เป็นการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ซึ่งทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก ทำให้ไม่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์อุณหภูมิ

เมื่อให้ไบอัสตรงแก่ไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมพีเอ็นไดโอดจะลดลง ซึ่งเป็นไปตามสมการ $V = (\frac{kT}{q})\ln(\frac{I}{I_0}+1)$ และ $I_0 = qAKT^3 \exp(-\frac{E_g}{kT})(\frac{D_n}{L_n} + \frac{D_p}{L_p})$ จากสองสมการนี้จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการแสอิ่มตัวย้อนกลับจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งทำให้เทอม $\ln(\frac{I}{I_0}+1)$ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเทอมนี้จะมีผลมากกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเทอม $(\frac{kT}{q})$ ทำให้แรงดันมีค่าลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองก็เป็นไปตามทฤษฎี และจากการทดลองการลดลงของแรงดันขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็เป็นแบบเส้นตรง ซึ่งเป็นไปตามสมการ $\frac{E_g - eV_{a2}}{kT_2} = \frac{E_g - eV_{a1}}{kT_1}$ และจากการทดลองไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอุณหภูมิมีความชันมากที่สุดในไดโอด 4 ชนิด นั่นหมายความว่ามีความไวมากที่สุด และเมื่อทำการทดลองเปลี่ยนกระแสที่ไบอัสตรงให้แก่พีเอ็นไดโอด ก็จะเห็นได้ว่ากราฟของอุณหภูมิและแรงดันนั้นจะยกสูงขึ้น ซึ่งก็หมายความสามารถวัดอุณหภูมิในช่วงที่กว้างมากขึ้นนั่นเอง แต่จะมีความไวลดลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกระแสไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น ก็เป็นการใช้พลังงานมากขึ้น ในขณะที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ย่านกว้างขึ้น ก็เป็นการเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วยเช่นกัน

จากทั้งหมดที่ได้กล่าวมาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. P-N Diode , Zener Diode , LED มีการเปลี่ยนระหว่างแรงดันและอุณหภูมิเป็นเชิงเส้นดี
2. P-N Diode มีการเปลี่ยนระหว่างแรงดันและอุณหภูมิเป็นเชิงเส้นดีกว่า Schottky Diode
3. LED มีย่านการวัดอุณหภูมิกว้างกว่า P-N Diode เพราะมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่า
4. เมื่อเพิ่มกระแสไบอัสให้แก่ P-N Diode และ LED แล้วจะได้ย่านการวัดอุณหภูมิกว้างมากขึ้น แต่จะมี Sensitivity ลดลง
5. P-N Diode มี Sensitivity ดีกว่า LED และ Zener Diode
6. P-N Diode ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติเป็นไดโอดที่ดีพอควร
7. วงจรไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถนำมาต่อกับพีเอ็นไดโอด ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิและและแสดงค่าออกมาให้ผู้อ่านได้ดี
8. ศึกษากระบวนการสร้างพีเอ็นไดโอดและเข้าใจกระบวนสร้างได้

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าพีเอ็นไดโอดนั้นมีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาประดิษฐ์เป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิและมี Sensitivity มากที่สุด ซึ่งจะเป็นการง่ายที่จะนำสัญญาณแรงดันที่ได้ไปใช้ร่วมกับวงจรแสดงผลแบบอนาลอก โดยวงจรแสดงผลแบบอนาลอกที่สร้างขึ้นมานั้น ก็สามารถต่อร่วมกับพีเอ็นไดโอดและสามารถแสดงผลให้ผู้ใช้อ่านค่าอุณหภูมิได้อย่างดี ซึ่งจากกราฟอาจจะมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อย แต่แรงดันที่ทางออกก็มีความเป็นเชิงเส้นดีและมีความความชัน 9.8 mV / ^{0}C ซึ่งใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้คือ 10 mV / ^{0}C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

Data Sheet

Diode 1N4148

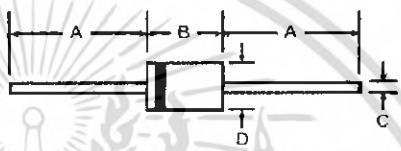
DIODES INCORPORATED

1N4148 / 1N4448

FAST SWITCHING DIODE

Features

- Fast Switching Speed
- General Purpose Rectification
- Silicon Epitaxial Planar Construction



Mechanical Data

- Case: DO-35
- Leads: Solderable per MIL-STD-202, Method 206
- Polarity: Cathode Band
- Marking: Type Number
- Weight: 0.13 grams (approx.)

DO-35		
Dim	Min	Max
A	25.40	
B		4.00
C		0.60
D		2.00
All Dimensions in mm		

Maximum Ratings @ T_A = 25°C unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	1N4148	1N4448	Unit
Non-Repetitive Peak Reverse Voltage	V_{RM}	100		V
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	75		V
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	53		V
Forward Continuous Current (Note 1)	I_{FM}	300	500	mA
Average Rectified Output Current (Note 1)	I_O	150		mA
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current @ t = 1.0s @ t = 1.0μs	I_{FSM}	1.0 2.0		A
Power Dissipation (Note 1) Derate Above 25°C	P_d	500 1.68		mW mW/°C
Thermal Resistance, Junction to Ambient Air (Note 1)	$R_{\theta JA}$	300		K/W
Operating and Storage Temperature Range	T_j, T_{STG}	-65 to +175		°C

Electrical Characteristics @ T_A = 25°C unless otherwise specified

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit	Test Condition
Maximum Forward Voltage	1N4148 1N4448 1N4448	V_{FM}	0.62	1.0 0.72 1.0	V	I_F = 10mA I_F = 5.0mA I_F = 100mA
Maximum Peak Reverse Current		I_{RM}		5.0 50 30 25	μA μA μA nA	V_R = 75V V_R = 70V, T_j = 150°C V_R = 20V, T_j = 150°C V_R = 20V
Capacitance		C_j		4.0	pF	V_R = 0, f = 1.0MHz
Reverse Recovery Time		t_{rr}		4.0	ns	I_F = 10mA to I_R = 1.0mA V_R = 6.0V, R_L = 100Ω

Notes: 1. Valid provided that device terminals are kept at ambient temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

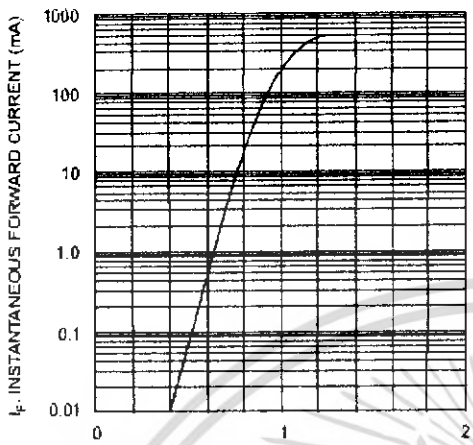


Fig. 1 Forward Characteristics

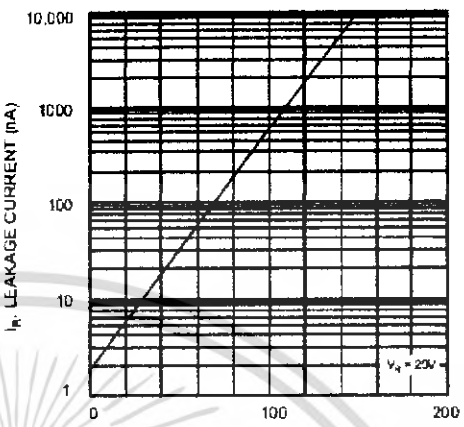


Fig. 2, Leakage Current vs Junction Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

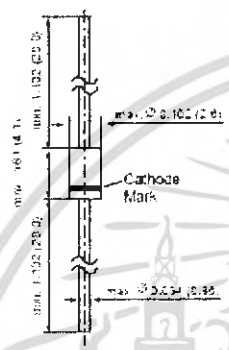
Data Sheet

Zener Diode 1N4728

1N4728 THRU 1N4764

ZENER DIODES

DO-41 Glass



Dimensions in inches and (millimeters)

FEATURES

- Silicon Planar Power Zener Diodes
- For use in stabilizing and clioping circuits with high power rating.
- Standard Zener voltage tolerance is ±10%. Add suffix 'A' for ±5% tolerance. Other Zener voltages and tolerances are available upon request.
- These diodes are also available in the MELF case with type designation ZM4728 thru ZM4764

MECHANICAL DATA

Case: DO-41 Glass Case
Weight: approx. 0.35 g

MAXIMUM RATINGS

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified

	SYMBOL	VALUE	UNIT
Zener Current (see Table "Characteristics")			
Power Dissipation at Tamb = 25°C	Ptot	1.0[1]	Watts
Junction Temperature	T_j	175	°C
Storage Temperature Range	T_s	– 65 to +175	°C

Characteristics at Tamb = 25 °C

	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Thermal Resistance Junction to Ambient Air	RthJA	–	–	170[1]	°C/W
Forward Voltage at IF = 200 mA	VF	–	–	1.2	Volts

NOTES:
(1) Valid provided that electrodes at a distance of 10mm from case are kept at ambient temperature

GENERAL SEMICONDUCTOR

12/3/98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1N4728 THRU 1N4764

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified

Type	Nominal Zener voltage[3] at I_{ZT} V_Z V	Test current I_{ZT} mA	Maximum Zener Impedance[1] Z_{ZT} at I_{ZT} Ω	Z_{ZK} Ω	at I_{ZK} mA	Maximum reverse leakage current I_R μA	at V_R V	Surge current at T_A = 25°C I_R mA	Maximum regulator current[2] I_{ZM} mA
1N4728	3.3	76	10	400	1.0	100	1	1380	276
1N4729	3.6	69	10	400	1.0	100	1	1260	252
1N4730	3.9	64	9	400	1.0	50	1	1190	234
1N4731	4.3	58	9	400	1.0	10	1	1070	217
1N4732	4.7	53	8	500	1.0	10	1	970	193
1N4733	5.1	49	7	550	1.0	10	1	890	178
1N4734	5.6	45	5	600	1.0	10	2	810	162
1N4735	6.2	41	2	700	1.0	10	3	730	146
1N4736	6.8	37	3.5	700	1.0	10	4	660	133
1N4737	7.5	34	4.0	700	0.5	10	5	605	121
1N4738	8.2	31	4.5	700	0.5	10	6	550	110
1N4739	9.1	28	5.0	700	0.5	10	7	500	100
1N4740	10	25	7	700	0.25	10	7.6	454	91
1N4741	11	23	8	700	0.25	5	8.4	414	83
1N4742	12	21	9	700	0.25	5	9.1	380	76
1N4743	13	19	10	700	0.25	5	9.9	344	69
1N4744	15	17	14	700	0.25	5	11.4	304	61
1N4745	16	15.5	16	700	0.25	5	12.2	295	57
1N4746	18	14	20	750	0.25	5	13.7	250	50
1N4747	20	12.5	22	750	0.25	5	15.2	225	45
1N4748	22	11.5	23	750	0.25	5	16.7	205	41
1N4749	24	10.5	25	750	0.25	5	18.2	190	38
1N4750	27	9.5	35	750	0.25	5	20.6	170	34
1N4751	30	8.5	40	1000	0.25	5	22.8	150	30
1N4752	33	7.5	45	1000	0.25	5	25.1	135	27
1N4753	36	7.0	50	1000	0.25	5	27.4	125	25
1N4754	39	6.5	60	1000	0.25	5	29.7	115	23
1N4755	43	6.0	70	1500	0.25	5	32.7	110	22
1N4756	47	5.5	80	1500	0.25	5	35.8	95	19
1N4757	51	5.0	95	1500	0.25	5	38.8	90	18
1N4758	56	4.5	110	2000	0.25	5	42.6	80	16
1N4759	62	4.0	125	2000	0.25	5	47.1	70	14
1N4760	68	3.7	150	2000	0.25	5	51.7	65	13
1N4761	75	3.3	175	2000	0.25	5	56.0	60	12
1N4762	82	3.0	200	3000	0.25	5	62.2	55	11
1N4763	91	2.8	250	3000	0.25	5	69.2	50	10
1N4764	100	2.5	350	3000	0.25	5	76.0	45	9

NOTES:

(1) The Zener impedance is derived from the 1KHZ AC voltage which results when an AC current having an RMS value equal to 10% of the Zener current (I_{ZT} or I_{ZK}) is superimposed on I_{ZT} or I_{ZK}. Zener impedance is measured at two points to insure a sharp knee on the breakdown curve and to eliminate unstable units

(2) Valid provided that electrodes at a distance of 10mm from case are kept at ambient temperature

(3) Measured under thermal equilibrium and DC test conditions

GENERAL SEMICONDUCTOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data Sheet

Schottky Diode 1N4148

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

1N5817 - 1N5819

Features

- 1.0 ampere operation at T_A = 90°C with no thermal runaway
- For use in low voltage, high frequency inverters free wheeling, and polarity protection applications

DO-41
COLOR BAND DENOTES CATHODE

Schottky Rectifiers

Absolute Maximum Ratings*

T_A = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value			Units
		1N5817	1N5818	1N5819	
V_{RRM}	Maximum Repetitive Reverse Voltage	20	30	40	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current .375 " lead length @ T_L = 90°C	1.0			A
I_{FSM}	Non-repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave	25			A
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +125			°C
T_J	Operating Junction Temperature	-65 to +125			°C

* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Value	Units
P_D	Power Dissipation	1.25	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	80	°C/W

Electrical Characteristics

T_A = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter		Device			Units
			1N5817	1N5818	1N5819	
V_F	Forward Voltage	@ 1.0 A	450	550	600	mV
		@ 3.0 A	750	875	900	mV
I_R	Reverse Current @ rated V_R	T_A = 25°C		0.5		mA
		T_A = 100°C		10		mA
C_T	Total Capacitance V_R = 4.0 V, f = 1.0 MHz			110		pF

©2001 Fairchild Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data Sheet

Light Emitting Diode 1N5765

62035	1N5765 1N6092 1N6093 1N6094	JAN QUALIFIED HERMETIC LED INDICATORS	Mii OPTOELECTRONIC PRODUCTS DIVISION

Features:

- Hermetically sealed
- Choice of colors (Red, Yellow, Green)
- Wide Viewing Angle
- Panel Mount versions with wire wrappable leads
- Designed for Hi-Reliability applications

Applications:

- P.C. Board Fault Indicator
- Logic Status Indicator
- Binary Data Display
- Power supply on/off indicator

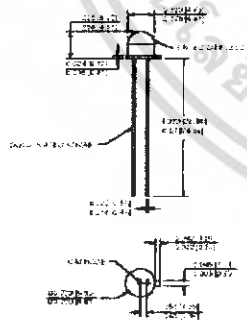
DESCRIPTION

The ***1N5765***, ***1N6092***, ***1N6093*** and ***1N6094*** series indicators are hermetically sealed in TO-46 packages. A tinted diffused dome lens provides good on-off contrast and a wide viewing angle. The 1N5765 indicator utilizes a GaAsP on GaAs LED. The 1N6092 (red) and 1N6093 (yellow) indicators utilize a high efficiency GaAsP on GaP LED, while the 1N6094 indicator utilizes a GaP on GaP LED. Each type uses a colored diffused plastic lens over a glass window. All versions are available in standard, JAN or JANTX screened levels.

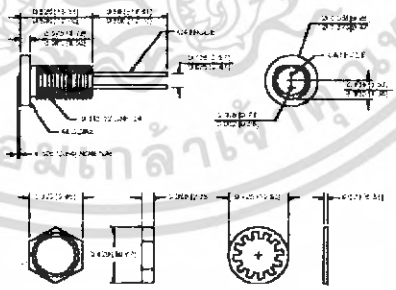
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Storage Temperature	-65°C to +100°C
Operating Temperature	-55°C to +100°C
Reverse Voltage	5Vdc
Reverse Voltage (1N5765)	4Vdc
Power Dissipation (Derate at the rate of 2.4 mW/°C above 50°C)	120mW
Power Dissipation (1N5765)....(Derate at the rate of 3.0 mW/°C above 50°C)	150mW
Forward Current-Continuous	35mA
Forward Current-Continuous (1N5765)	50mA
Lead Soldering Temperature (1/16" (1.6mm) from case for 10 seconds)	260°C
Maximum Mounting Torque (Panel mount version)	25in•lbs

Indicator Dimensions



Panel Mount Dimensions



Schematic Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

62035 ***1N5765***
1N6092
1N6093
1N6094

JAN QUALIFIED, HERMETIC LED INDICATORS

***ELECTRICAL/OPTICAL CHARACTERISTICS TA=25°C**

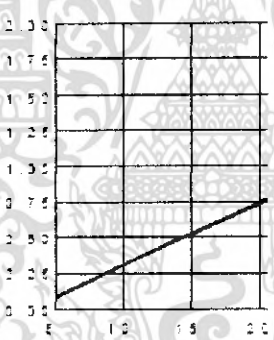
PART NUMBER	COLOR	TEST CONDITION	PARAMETER LIMITS				
		I_F	PEAK λ	I_v @ $\theta = 0°$	$I_{v/2}$ @ $\theta = 30°$	V_F	C
		mA	TYP	MIN.	MIN.	MAX.	MAX.
1N5765	RED	20	655	.5mcd	.3 mcd.	2V	300pF
1N6092 MIL19500/519	RED	20	635	3 mcd	1.5 mcd.	3V	100pF
1N6093 MIL19500/520	YELLOW	20	585	3 mcd	1.5 mcd.	3V	100pF
1N6094 MIL19500/521	GREEN	20	570	3 mcd	1.5 mcd.	3V	100pF

RED/YELLOW

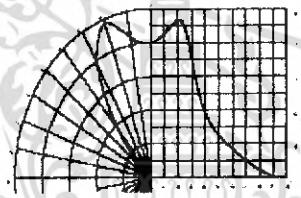
I_F - Forward Current - mA
Relative Luminous Intensity
vs
Forward Current
(Normalized at 20mA)

GREEN

I_F - Forward Current – mA
Relative Luminous Intensity
vs
Forward Current
(Normalized at 25mA)



Relative Luminous Intensity vs. Angular Displacement



RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS:

PARAMETER	SYMBOL	MIN	MAX	UNITS
Forward	I_F	20	35	mA
Operating Temperature	T_A	-65	+100	°C

SELECTION GUIDE

PART NUMBER	PART DESCRIPTION	CONTROLLING MIL DOCUMENT
JAN or JANTX1N5765*	TO-46 LED Indicator	MIL-PRF-19500/467
JAN or JANTX1N6092	TO-46 LED Indicator	MIL-PRF-19500/519A
JAN or JANTXM19500/519	Panel Mount Version, LED Indicator	MIL-PRF-19500/519A
JAN or JANTX1N6093	TO-46 LED Indicator	MIL-PRF-19500/520A
JAN or JANTXM19500/520	Panel Mount Version, LED Indicator	MIL-PRF-19500/520A
JAN or JANTX1N6094	TO-46 LED Indicator	MIL-PRF-19500/521A
JAN or JANTXM19500/521	Panel Mount Version, LED Indicator	MIL-PRF-19500/521A

NOTE:
1. JAN Quality level is designated by adding -01 to part #
2. JANTX Quality level is designated by adding -02 to part #

*Panel mount version available from factory

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ผศ.ดร.มานะ สรยุทธศักดิ์ , รศ.กฤษดา วิศวธีรานนท์ "เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ" พิมพ์โดย โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่ 1 , เมษายน 2548

2. รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช " เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์" ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พิมพ์ครั้งที่ 2 , สิงหาคม 2547

3. รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช " เซมิคอนดัคเตอร์ฟิสิกส์" ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พิมพ์ครั้งที่ 2 สิงหาคม 2544

4. D.Neamen , "Semiconductor Physics & Devices , Erwin , 2006

5. Julian W.Gardner , Vijay K.Varadan , Osama O.Awadelkarim " Microsensors , Mens , Smart Devices " , John Wiley & Sons , 1996

6. S.M. SZE , "Semiconductor Senser" , John Wiley & Sons , 1994

7. S.Middelhoek , S.A. Audet , "Silicon Sensor" , Academic Press , 1989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้